
ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 625.03

Волнообразный износ рельсов на трамвайном транспорте

Е. П. Дудкин, Я. С. Хомяков, Д. А. Каковко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Дудкин Е. П., Хомяков Я. С., Каковко Д. А. Волнообразный износ рельсов на трамвайном транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 123–133. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-123-133

Аннотация

Цель: рассмотрение проблемы волнообразного износа рельсов на трамвайном транспорте. Обзор исследований по проблеме волнообразного износа рельсов и действующей нормативной документации. Изучение современных методов борьбы с волнообразным износом и мер по предотвращению или снижению его проявления. Понимание причин и механизмов волнообразного износа рельсов для разработки эффективных стратегий и мероприятий для обеспечения безопасности и надежности трамвайного сообщения, увеличения срока службы инфраструктуры и сокращения затрат на ее техническое обслуживание и ремонт. **Методы:** анализ научной литературы и исследовательских работ по теме волнообразного износа рельсов. Обобщение и систематизация информации о причинах волнообразного износа, его влиянии на работу системы «колесо — рельс» и методах борьбы с ним. Описание исторических аспектов изучения проблемы волнообразного износа и современных подходов к ее решению. Выявление и анализ мероприятий, направленных на снижение волнообразного износа и повышение эффективности работы трамвайного транспорта. Представление рекомендаций по улучшению нормативной базы и повышению безопасности трамвайного движения. **Результаты:** обобщены причины возникновения волнообразного износа рельсов, рассмотрены его особенности. Указано на необходимость совершенствования нормативной базы по содержанию трамвайных путей. Предложены меры по продлению срока службы рельсов и недопущению развития волнообразного износа. **Практическая значимость:** статья представляет собой систематизированное исследование проблемы волнообразного износа рельсов на трамвайном транспорте, которое может быть использовано специалистами в данной области для разработки эффективных методов нормирования этого явления и борьбы с ним. Полученные результаты также могут быть полезны для студентов и преподавателей транспортных вузов, изучающих вопросы эксплуатации и обслуживания рельсового транспорта.

Ключевые слова: трамвайный путь, волнообразный износ, шлифовка рельсов, фрезерование рельсов, техническое содержание путей.

Введение

Основным элементом верхнего строения пути являются рельсы. Они не только воспринимают нагрузку от подвижного состава, но и задают направление движения колеса по рельсу. Состояние рельсов напрямую влияет на безопасность движения экипажа по рельсовому пути, на характер взаимодействия «колесо — рельс» и плавность движения.

При эксплуатации пути в рельсах постепенно возникают износ, смятие, коррозия и усталость металла. Вследствие этих процессов в рельсах появляются различные дефекты, которые характеризуются отклонениями от утвержденных норм их геометрических и прочностных характеристик, соблюдение которых гарантирует работоспособное состояние рельса в заданных условиях эксплуатации [1].

Одним из дефектов, природа которого на сегодня до конца не изучена, а его проявление носит частый и практически случайный характер, является волнообразный износ.

История исследования проблемы

Первые упоминания о волнообразном износе относятся к концу XIX века. На железных дорогах Великобритании [2], США [3] и Германии, а позднее и Индии [2] при паровой тяге был отмечен волнообразный износ отдельных рельсов, у которых наблюдались характерные возвышения на головке, располагающиеся через равные промежутки (от 4 до 6 см). Рельсы с таким типом износа были обнаружены в равной степени как на прямых участках пути, так и в кривых, на площадках и уклонах, но во всех случаях подобный износ затрагивал только одиночные рельсы, износ на обоих рельсовых нитях встречался в единичных случаях [2].

В первой половине XX века с развитием электрификации железных дорог и активным строительством трамвайных линий все чаще отмечался волнообразный износ как отдельных рельсов магистральных железнодорожных линий, так и желобчатых рельсов трамвайных путей [2].

Первые исследователи явления волнообразного износа искали причину дефекта в свойствах самих рельсов. Основными причинами возникновения волн считались неудовлетворительное качество рельсовой стали и дефекты проката [2].

Наряду с проблемами качества рельсов отмечалось влияние жесткости подрельсового основания. Было установлено, что при перекладке рельсов с волнообразным износом на другие участки того же пути или при частичной замене, присыпке балласта другого вида, а также при смене подвижного состава ранее рифленые рельсы начинали изнашиваться гладко [2, 4]. В связи с этим обсуждались теории возникновения волнообразного износа как результата резонанса конструкции пути и элементов подвижного состава в определенных условиях [2].

В 1920-х годах на зарубежных железных дорогах начинается активная борьба с волнообразным износом путем шлифования рельсов [5].

В середине XX века с развитием металлургической промышленности и методов исследования структуры стали значительно повысилось качество рельсов, но проблема волнообразного износа осталась актуальна, поскольку дефект по-прежнему активно проявлялся на вновь строящихся железных дорогах. Фокус исследований начал все больше сдвигаться в сторону изучения особенностей взаимодействия пути и подвижного состава в связи с внедрением новейших локомотивов (электровозов) с большими, чем у паровозов, ускорениями при торможении и трогании с места [4].

Развивается классификация волнообразных неровностей, происходит выделение коротких волн с длиной 35–75 мм и длинных — 500 мм и более. Выносятся предположения о различной природе возникновения волн разной длины [4, 5].

Инженер Н. П. Кондаков в качестве причины возникновения коротких волн отмечал микробоксование в виде следующих друг за другом срывов в скольжение отдельных колесных пар электровоза в местах реализации наибольших тормозных и тяговых усилий: на спусках, подъемах и их сочетаниях с кривыми. Уделял внимание изменениям в структуре стали в результате кратковременного, практически точечного нагрева и охлаждения чередующихся участков при таком характере боксования [4].

В 1958 году на XVII сессии Международной ассоциации железнодорожных конгрессов формируется общепризнанный перечень факторов, вызывающих волнообразный износ. Среди них все также выделяются качество рельсов (как металла, так и их проката), вибрационные воздействия в пути и подвижном составе, особенности режима движения локомотивов и их конструкция, а также влияние состояния пути и подвижного состава [5].

Общепризнанным также становится факт, что большинство высказанных причин не могут вызвать волнообразный износ самостоятельно, а их воздействие в совокупности повышает вероятность возникновения волнообразного износа [5].

Отечественные исследователи (М. И. Кулагин, Э. И. Кац) в середине 1960-х годов уделяют внимание волнообразному износу с длинными (50–250 см) волнами как наиболее часто встречающемуся на железных дорогах СССР. Исследования подтверждают теорию образования начальных неровностей на поверхности катания рельсов в результате осевого биения валов прокатных станов.

Также подтверждается влияние жесткости подрельсового основания на волнообразный износ. Установлено, что интенсивность развития волн на пути с железобетонными шпалами в 1,3–1,5 раза больше, чем с деревянными [5].

В 60–70-х годах совершенствуется технология шлифовки рельсов, разрабатываются рельсошлифовальные поезда, а также специальные путеизмерительные тележки, регистрирующие длину и амплитуду волн [5].

В 80–90-х годах за рубежом параллельно ведутся исследования образования коротких и длинных волн. Природа возникновения длинных волн уже не связы-

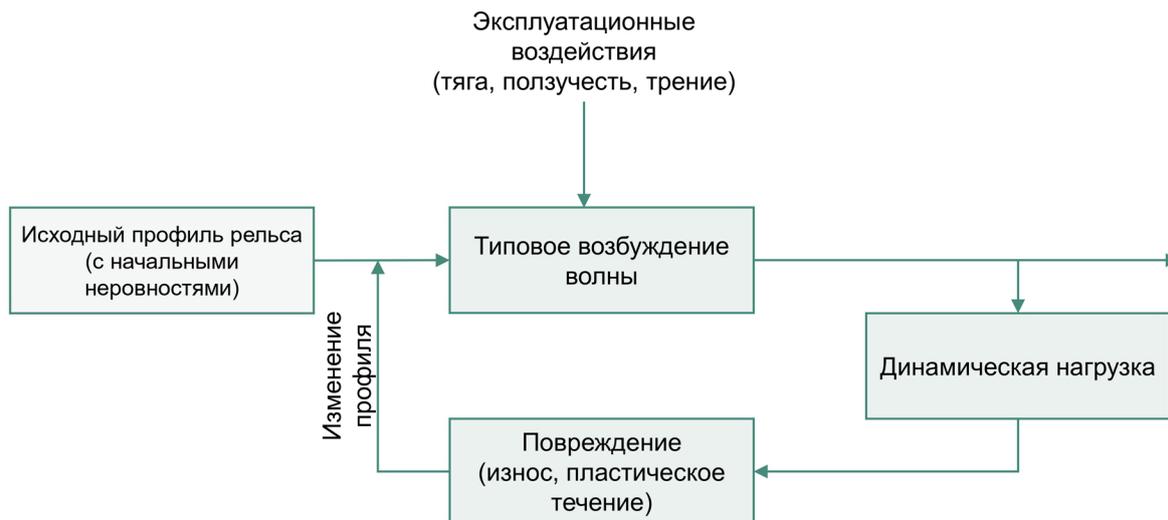


Рис. 1. Контур обратной связи возникновения и развития волнообразного износа, предложенный S. L. Grassie и J. Kalousek

вается с качеством проката, основной причиной считаются вертикальные динамические колебания неподрессоренной массы подвижного состава.

В 1993 году S. L. Grassie и J. Kalousek представили механизм образования волнообразного износа в виде обратной связи (рис. 1) [6].

В 2000-х годах отечественными авторами А. И. Козыревым и А. Алижаном установлена связь параметров волнообразного износа рельсов с динамическими свойствами системы «ходовые части — колесо» и скоростью. Подтверждается, что резонансные явления в рельсе при динамическом взаимодействии ходовых частей с верхним строением пути присутствуют всегда. Однако они являются необходимым, но не достаточным условием образования и развития волнообразного износа. В результате исследования резонансных явлений устанавливается, что подвижной состав имеет некоторые резонансные скорости движения, при которых происходит образование в упруго-деформированном рельсе резонирующих стоячих волн [7].

В 2010 году А. Алижан доказывает, что достаточным условием для образования волнообразных неровностей рельсов является эксплуатация на участке пути однотипного подвижного состава в узком диапазоне скоростей движения, включающем резонансные. Также приводится распределение групп факторов, инициирующих образование волнообразного износа, основными из которых являются:

- шероховатость и дефекты на поверхности катания колес;
- осевая нагрузка;
- однотипные перевозки однотипным подвижным составом;
- шероховатость и технологические неровности на поверхности катания рельсов;
- ослабление промежуточных рельсовых скреплений [3].

К концу 2010-х годов группа исследователей (С. К. Каргапольцев, П. В. Новосельцев, Ю. А. Крупцов) связывает возникновение волнообразного износа на прямых участках пути с периодическим проскальзыванием колеса по рельсам при торможении, которое связано с тем, что система взаимодействия «колесо — рельс» является колебательной. Величина проскальзывания зависит от скорости и технического состояния рельсового пути [8].

Аналогичные результаты получены в это время и за рубежом. Формируется теория неустойчивого качения, возникающего в переходных условиях: при ускорении и торможении. Неустойчивое качение характеризуется двумя фазами: в первой происходит устойчивое качение, во второй — срыв в скольжение за счет превышения тангенциальными силами сил сцепления колеса с рельсом, а затем возврат к состоянию сцепления за счет энергии вибрации колесной пары. Чередование качения и скольжения приводит к развитию пластической деформации металла головки рельса — образованию волн [6].

На 6-й линии метрополитена г. Чэнду (Китай), открытой для движения 18 декабря 2020 года, в кривой радиуса 600 м на внешнем рельсе был отмечен волнообразный износ с длинами волн 56–62 мм уже через 17 месяцев после начала эксплуатации.

Установлено, что волнообразный износ связан с развившимся двухточечным контактом колеса с рельсом в ходе их взаимного изнашивания и появлением самовозбуждающихся вибрационных колебаний [9].

Исследования причин возникновения волнообразного износа приводились и на высокоскоростных дорогах Китая на прямых участках пути. Механизм образования волнообразного износа рельса в этом случае был основан на резонансных явлениях в системе «колесо — рельс» [10, 11].

Вышеупомянутые факторы также актуальны и для трамвайного транспорта, насыщенного кривыми малых радиусов, характеризующегося однотипными перевозками и частыми изменениями режима движения со значительными ускорениями по сравнению с железнодорожным подвижным составом. Кроме того, трамвайный путь обладает в определенных смыслах достаточно сложными по сравнению с железной дорогой условиями эксплуатации.

Текущее состояние вопроса

На сегодняшний день проблема волнообразного износа остается актуальной как для железнодорожного транспорта, так и для трамвая.

В нормативной литературе РФ волнообразный износ достаточно полно описан для магистральных железных дорог. В инструкции «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 23 октября 2014 года № 2499р (далее — инструкция), приведен дефект с кодом 40 «волнообразный износ и смятие

головки рельса». Выделяются длинные (25–150 см) и короткие (менее 25 см) волны, а также приводятся причины возникновения волн разной длины [1].

В инструкции приводятся допусковые и критические параметры длины и глубины волн, при которых рельсы признаются дефектными, подлежат замене, шлифовке или требуется ограничение скорости.

На трамвайном транспорте проблема волнообразного износа отмечена в инструкции по техническому содержанию трамвайных путей 1992 года. В п. 2.3.13 указано, что рельсы с волнообразным износом выше нормы заменяются или шлифуются. При превышении нормы износа устанавливается ограничение скорости трамваев. Норма износа устанавливается исходя из длины и глубины волн [12].

Однако при каких значениях глубины и длины волн необходимо ограничивать скорость и до какого уровня, документ не регламентирует.

Эксплуатирующие организации городского электрического транспорта нормы волнообразного износа устанавливают самостоятельно. Так, в путевом хозяйстве ГЭТ города Санкт-Петербурга выделяется три категории волнообразного износа рельсов с длинами волн 30–120 мм:

- 1-я категория (волнообразный износ более 2 мм);
- 2-я категория (волнообразный износ от 0,5 до 2 мм);
- 3-я категория (волнообразный износ до 0,5 мм).

На рис. 2 представлена диаграмма распределения протяженности развернутой длины трамвайных путей (за исключением путей парков, конечных пунктов и подходов к ним) по категориям волнообразного износа по состоянию на начало 2018 и 2024 годов.

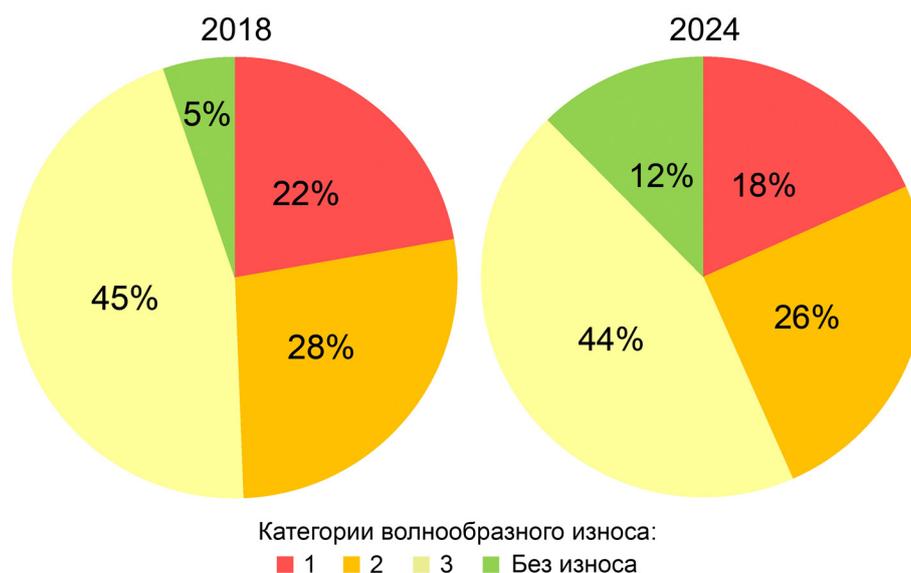


Рис. 2. Диаграмма распределения трамвайных путей по категориям волнообразного износа (%)

Как видно, на настоящий момент по-прежнему существенная доля путей (44 %) имеет волнообразный износ 3-й категории с волнами глубиной до 0,5 мм. Доля путей без износа значительно возросла (с 5 до 12 %) за счет активного ремонта путей с износом 1-й и 2-й категорий (замена рельсов).

Значительная часть участков имеет данную проблему. Важным на сегодняшний день является не только принятие мер по восстановлению рельсов с волнообразным износом, но и проведение мероприятий, направленных на снижение его появления.

Шлифовка и фрезерование рельсов

Значительный вклад в продление межремонтного срока службы путей на начальных этапах развития волнообразного износа может внести профилактическое шлифование рельсов.

Опыт таких зарубежных фирм, как Vossloh, показывает, что предупредительное удаление волн на начальном этапе их зарождения более эффективно, чем «агрессивное» шлифование волн с глубиной 1–2 мм.

Основным методом профилактической шлифовки, рекомендуемой Vossloh, является высокоскоростная шлифовка (HSG) специальной рельсошлифовальной машиной.

Профилактическую шлифовку в первую очередь целесообразно проводить на «больных» участках, где проблема наблюдается постоянно, а также в характерных местах, таких как:

- места резкого изменения продольного профиля (спуски, подъемы на мосты/эстакады);
- кривые малых радиусов;
- участки пересечения трамвайных путей с крупными потоками колесных транспортных средств;
- места неблагоприятного сочетания элементов плана и профиля (кривые на подъемах и спусках, кривые в зоне поперечного движения безрельсового транспорта);
- места смены типа подрельсового основания;
- участки с установившимся режимом — участки пути, по которым осуществляет движение однотипный подвижной состав с приблизительно одинаковыми осевой нагрузкой, типом тележек и техническим состоянием в одном и том же режиме (ускорение или торможение).

Для устранения же более глубоких волн обычного шлифования недостаточно, Vossloh рекомендует применение фрезерования. Фрезерование позволяет восстановить профиль рельса за счет снятия металла до 2 мм за один проход со скоростью 2–4 м в минуту.

Механизированная шлифовка рельсов и фрезерование позволяют получить ряд существенных эксплуатационных эффектов:

- снижение уровня шума при движении трамвая;
- повышение уровня комфорта пассажиров в салоне трамвая;
- повышение скорости движения трамваев;
- снижение динамических нагрузок на экипажную часть вагона;
- сокращение потребности в замене рельсов.

Заключение

Волнообразный износ рельсов в настоящий момент остается серьезной проблемой, с которой сталкивается рельсовый транспорт по всему миру.

Механизм образования и развития волнообразного износа заключается в случайном возникновении в ходе эксплуатации мелких начальных неровностей, которые сами по себе не приводят к образованию волн. Однако под действием определенных факторов (специфические воздействия подвижного состава, резонанс, неравноупругость пути и др.), носящих вероятностный характер, начальные неровности провоцируют износ прилегающих участков рельса, что ведет к образованию новых неровностей. Происходит лавинообразное нарастание интенсивности износа, формируются повторяющиеся через равные промежутки волны, длина которых зависит от динамических свойств подвижного состава и пути.

Основными причинами возникновения волнообразного износа в современных условиях являются:

- резонансные явления в системе «колесо — рельс», «ходовые части — колесо»;
- неустойчивое качение (микробоксование);
- двухточечный контакт колеса с рельсом.

Особенностью волнообразного износа является то, что он нередко затрагивает и свежееуложенный путь, созданный с применением новых материалов и современных конструкций. Появление данного дефекта снижает экономический эффект от строительства новых путей, сокращая сроки службы элементов верхнего строения [5, с. 39] и, соответственно, увеличивая долю затрат, отводимых на работы по текущему содержанию.

Для трамвайных путей в нормативном поле РФ волнообразный износ до сих пор не регламентирован, отсутствуют допуски по его проявлению и конкретные значения, при которых требуется выполнять те или иные мероприятия. В связи с чем необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований по определению допускаемых параметров волнообразного износа (длины и глубины волн) для заданных скоростей движения с целью обеспечения безопасной эксплуатации трамвайного транспорта.

Одной из основных мер по продлению срока службы рельсов и недопущению развития волнообразного износа является профилактическая шлифовка в том числе и новых рельсов.

Кроме того, необходимо проведение мероприятий, способствующих снижению интенсивности развития волнообразного износа:

- улучшение технического состояния подвижного состава (геометрии бандажей, более тщательное содержание экипажной части);
- лубрикация боковой поверхности рельса в кривых малого радиуса;
- подметание пути и очистка желобов для снижения абразивности внешних воздействий и предупреждения возникновения начальных неровностей;
- устройство пути на монолитном плитном основании, обеспечивающем равномерную жесткость подрельсового основания на всем протяжении пути;
- применение виброгасящих конструкций пути и колес подвижного состава, более эффективно поглощающих совместные колебания системы.

Библиографический список

1. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов: инструкция, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р.
2. Тихомиров К. Волнообразный износ рельсов // Журнал Министерства путей сообщения. Кн. VIII. СПб., 1905.
3. Алижан А. Влияние динамических процессов в системе «колесо — рельс» на образование волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов: автореферат. М., 2010. 24 с.
4. Кондаков Н. П. Волнообразный износ рельсов и меры борьбы с ним (по наблюдениям на Томской железной дороге): автореферат. Новосибирск, 1958. 15 с.
5. Кулагин М. И., Кац Э. И., Тюриков В. Н. Волнообразный износ рельсов. М.: Транспорт, 1970. 145 с.
6. Fangfang D. Numerical tribology of the wheel-rail contact: application to corrugation defect // L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2015. URL: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2015ISAL0019/these.pdf>
7. Козырев А. И. Связь параметров волнообразного износа рельсов с динамическими свойствами системы «ходовые части — путь» и скоростью // Национальная ассоциация ученых (НАУ). 2015. Т. 2, № 7. С. 111–115.
8. Каргапольцев С. К., Новосельцев П. В., Крупцов Ю. А. Волнообразный износ рельсов при торможении // Мир транспорта. 2017. Т. 15, № 5. С. 46–53.
9. Study on the Formation Mechanism for High Rail Corrugation / Q. Song [et al.] // Tribology Transactions. 2024. Vol. 67, iss. 1. P. 141–156. DOI: 10.1080/10402004.2024.2301717
10. New Insights into the Short Pitch Corrugation Enigma Based on 3D-FE Coupled Dynamic Vehicle-Track Modeling of Frictional Rolling Contact / S. Li [et al.] // Appl. Sci. 2017. Vol. 7. P. 807. DOI: 10.3390/app7080807
11. An assessment method of rail corrugation based on wheel–rail vertical force and its application for rail grinding / L. Niu [et al.] // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2023. Vol. 13 (4–5). P. 1131–1150. DOI: 10.1007/s13349-023-00700-w

12. Инструкция по техническому содержанию трамвайных путей, утв. и введена в действие 01.01.1993 приказом концерна «Росгорэлектротранс» от 30.12.1992 № 112. 96 с.

13. Wang Z., Lei Z. Formation Mechanism of Metro Rail Corrugation Based on Wheel-Rail Stick-Slip Behaviors // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 8128. DOI: 10.3390/app11178128

Дата поступления: 07.08.2024

Решение о публикации: 15.10.2024

Контактная информация:

ДУДКИН Евгений Павлович — докт. техн. наук, профессор; ed@pgups-tempus.ru

ХОМЯКОВ Ярослав Сергеевич — аспирант; jaro97@mail.ru

КАКОВКО Дмитрий Андреевич — студент; dmank@mail.ru

Wave-shaped depreciation of rails on tram transport

E. P. Dudkin, J. S. Khomyakov, D. A. Kakovko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Dudkin E. P., Khomyakov Y. S., Kakovko D. A. Wave-shaped depreciation of rails on tram transport // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 123–133. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-123-133*

Abstract

Purpose: to consider the problem of wave-shaped depreciation of rails on tram transport. A review of research on the problem of wave-shaped wear of rails and current regulatory documentation. The study of modern methods of combating wave-like wear and measures to prevent or reduce its manifestation. Understanding the causes and mechanisms of rail corrugation in order to develop effective strategies and measures to ensure the safety and reliability of tram services, increase the service life of infrastructure and reduce the cost of its maintenance and repair. **Methods:** analysis of scientific literature and research papers on the topic of rail corrugation. Generalization and systematization of information about the causes of wave-like wear, its effect on the operation of the wheel-rail system and methods of combating it. Description of the historical aspects of studying the problem of wave-like wear and modern approaches to its solution. Identification and analysis of measures aimed at reducing corrugation and improving the efficiency of tram transport. Presentation of recommendations on improving the regulatory framework and improving the safety of tram traffic. **Results:** the causes of rail corrugation are summarized, its features are considered. The need to improve the regulatory framework for the maintenance of tramways is indicated. Measures are given to extend the service life of rails and prevent the development of corrugation. **Practical importance:** the article is a systematic study of the problem of wave-shaped depreciation of rail in tram transport, which can be used by specialists in this field to develop effective methods of rationing this phenomenon and combating it. The results obtained can also be useful for students and teachers of transport universities studying the issues of operation and maintenance of rail transport.

Keywords: tram, wave-shaped wear, rail corrugation, grinding of rails, milling of rails, track maintenance.

References

1. Defekty rel'sov. Klassifikaciya, katalog i parametry defektnyh i ostrodefektnyh rel'sov: instrukciya, utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 23.10.2014 № 2499r. (In Russian)
2. Tikhomirov K. Volnoobraznyj iznos rel'sov // Zhurnal Ministerstva putej soobshheniya. Kn. VIII. SPb., 1905. (In Russian)
3. Alizhan A. Vliyanie dinamicheskikh processov v sisteme "koleso — rel's" na obrazovanie volnoobraznyh nerovnostej na poverhnosti kataniya rel'sov: avtoreferat. M., 2010. (In Russian)
4. Kondakov N. P. Volnoobraznyj iznos rel'sov i mery bor'by s nim (po nablyudenyam na Tomskoj zheleznoj doroge): avtoreferat. Novosibirsk, 1958. (In Russian)
5. Kulagin M. I., Katz E. I., Tyurikov V. N. Volnoobraznyj iznos rel'sov. M.: Transport, 1970, 145 p. (In Russian)
6. Fangfang D. Numerical tribology of the wheel-rail contact: application to corrugation defect // L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2015. URL: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2015ISAL0019/these.pdf>
7. Kozyrev A. I. Svyaz' parametrov volnoobraznogo iznosa rel'sov s dinamicheskimi svojstvami sistemy "hodovye chasti — put'" i skorost'yu // Nacional'naya asociaciya uchenyh (NAU). 2015. T. 2, No. 7. S. 111–115. (In Russian)
8. Kargapoltsev S. K., Novoseltsev P. V., Kuptsov Yu. A. Volnoobraznyj iznos rel'sov pri tormozhenii // Mir transporta. 2017. T. 15, No. 5. S. 46–53. (In Russian)
9. Study on the Formation Mechanism for High Rail Corrugation / Q. Song [et al.] // Tribology Transactions. 2024. Vol. 67, iss. 1. P. 141–156. DOI: 10.1080/10402004.2024.2301717
10. New Insights into the Short Pitch Corrugation Enigma Based on 3D-FE Coupled Dynamic Vehicle-Track Modeling of Frictional Rolling Contact / S. Li [et al.] // Appl. Sci. 2017. Vol. 7. P. 807. DOI: 10.3390/app7080807
11. An assessment method of rail corrugation based on wheel–rail vertical force and its application for rail grinding / L. Niu [et al.] // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2023. Vol. 13 (4–5). P. 1131–1150. DOI: 10.1007/s13349-023-00700-w
12. Instrukciya po tekhnicheskomu sodержaniyu tramvajnyh putej, utv. i vvedena v dejstvie 01.01.1993 prikazom koncerna "Rosgorelektrotrans" ot 30.12.1992 № 112. 96 p. (In Russian)
13. Wang Z., Lei Z. Formation Mechanism of Metro Rail Corrugation Based on Wheel-Rail Stick-Slip Behaviors // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 8128. DOI: 10.3390/app11178128

Received: 07.08.2024

Accepted: 15.10.2024

Author's information:

Evgenii P. DUDKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ed@pgups-tempus.ru

Jaroslav S. KHOMYAKOV — Postgraduate Student; jaro97@mail.ru

Dmitrii A. KAKOVKO — Student; dmank@mail.ru