



ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ НЕРОВНОСТЕЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ И ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Нормуродов Мусурмон Суннатович

Аннотация: В данной статье анализируются конструктивные и динамические проблемы, возникающие в результате изменения температурного режима на звеньевом и бесстыковом железнодорожных путях в условиях резко континентального климата. В рамках исследования с помощью математического моделирования и графического анализа изучено влияние геометрических неровностей (зазоров) в элементах рельсовых стыков на динамические силы удара и осевые напряжения в системе «вагон–путь». Научно обосновано, что на звеньевом пути при снижении температуры увеличение зазоров приводит к параболическому росту амплитуды вертикальной силы удара, тогда как на бесстыковом пути (CWR) при экстремальных температурах возникает риск потери устойчивости (выброса) или излома рельса. В заключении статьи предложен комплекс инженерно-технических и практических решений, включая применение эластично-композитных скреплений, резиновых прокладок и пружинных клемм (Pandrol, APC), направленных на повышение безопасности движения и продление срока службы элементов вагонов, тормозных систем и буксовых узлов.

Ключевые слова: звеньевой путь, бесстыковой путь, рельсовый стык, геометрическая неровность, динамическая сила удара, осевое напряжение, температурная деформация, безопасность движения, упругое скрепление, динамика вагона.

Abstract: This paper analyzes the structural and dynamic challenges arising from temperature fluctuations on jointed and continuous welded rail (CWR) tracks under severe continental climate conditions. Within the framework of the study, the impact of geometric irregularities (gaps) in rail joint elements on dynamic impact forces and axial stresses in the "wagon-track" system was investigated using mathematical modeling and graphical evaluation. It is scientifically proven that on jointed tracks, an increase in gap size due to dropping temperatures leads to a parabolic growth in the amplitude of the vertical impact force, whereas on CWR tracks, extreme temperatures induce risks of track buckling (wybros) or rail breakage. Finally, a comprehensive set of engineering, technical, and practical recommendations is proposed, including the implementation of elastic-composite



fasteners, rubber pads, and spring clips (Pandrol, ARS) aimed at enhancing traffic safety and extending the service life of wagon structures, braking systems, and axle box units.

Keywords: jointed track, continuous welded rail (CWR), rail joint, geometric irregularity, dynamic impact force, axial stress, thermal deformation, railway safety, elastic fastener, wagon dynamics.

Стабильное развитие современной железнодорожной транспортной системы и обеспечение высокого уровня безопасности грузовых и пассажирских перевозок напрямую зависят от качества динамического взаимодействия подвижного состава и путевой инфраструктуры. В эпоху, когда железнодорожный транспорт как ведущая отрасль экономики требует увеличения объемов грузоперевозок и повышения скоростей движения, техническое состояние элементов рельсовых стыков на традиционном звеньевом пути и их геометрические неровности (зазоры) остаются одной из наиболее актуальных проблем для специалистов отрасли. Хотя конструктивные зазоры, оставляемые между рельсами, служат для компенсации линейного теплового расширения стального материала в условиях резко континентального климата, прохождение колесных пар движущегося поезда через эти точки соединения приводит к возникновению сильных динамических ударов, высокой вибрации и интенсивного шума. Эти периодические ударные нагрузки не только вызывают преждевременный износ и деформацию концов рельсов и скрепляющих элементов, но и оказывают негативное усталостное воздействие на тормозные системы, бандажи колесных пар, буксовые узлы и общую рессорную подвеску вагонов, резко сокращая срок службы всей конструкции подвижного состава. В практике развитых зарубежных стран для устранения данной проблемы широко применяется технология бесстыкового пути (Continuous Welded Rail — CWR), позволяющая добиться плавности хода и энергоэффективности, однако крайне высокие годовые и суточные колебания температур в условиях Узбекистана вызывают колоссальные внутренние термические напряжения в рельсовых плетях, что не позволяет полностью отказаться от звеньевых путей. Именно поэтому математическое моделирование геометрических неровностей на существующих звеньевых путях, оптимизация размеров зазоров в соответствии с температурными режимами и разработка новых методов эксплуатации с целью повышения безопасности движения поездов и снижения



динамических ударных сил в системе «вагон–рельс» составляют основную цель данного исследования.

При использовании звеньевых путей в системе железнодорожного транспорта геометрические неровности в зоне рельсовых стыков являются наиболее уязвимой точкой, определяющей срок службы подвижного состава и элементов верхнего строения пути. Основная проблема заключается в том, что конструктивный зазор, оставляемый для компенсации линейной деформации рельсового материала под воздействием температурных изменений, приводит к разрыву непрерывной поверхности качения при прохождении колеса поезда, в результате чего в этой точке возникает кинематический ударный эффект. С увеличением скорости соударения колесной пары с рельсовым стыком и динамического веса поезда вертикальные и горизонтальные динамические силы, возникающие в этой зоне, резко возрастают по нелинейному закону. Эти напряжения ускоряют смятие концов рельсов, образование наклепа (растекания металла), ослабление накладок и болтовых соединений, а также интенсивную просадку балластного слоя, что ускоряет расстройство геометрии пути. Со стороны вагонов эти постоянные ударные колебания вызывают усталостные трещины в бандажах колес, приводят к перегреву и преждевременному выходу из строя буксовых подшипников, а также снижают эластичность рессорного подвешивания, нанося повреждения механическим узлам тормозной системы. В условиях резко континентального климата, например, в жаркие летние дни, когда температура поверхности рельса значительно превышает температуру воздуха и достигает более $+60^{\circ}\text{C}$, неправильно рассчитанный размер зазора может привести к взаимному упиранию рельсов и внезапному боковому искривлению пути (выбросу пути), что является катастрофической ситуацией; зимой же, напротив, чрезмерное раскрытие зазоров приводит к срезу стыковых болтов и достижению максимальной силы удара колеса. Технология цельносварного бесстыкового пути, применяемая в развитых странах, устраняет эти проблемы, однако ее полное внедрение на всех участках железных дорог нашей страны, особенно в регионах с высокими температурными колебаниями и сложным профилем пути, порождает проблемы высоких экономических затрат и управления сильными внутренними термическими напряжениями. По этой причине, с учетом температурных напряжений внутри рельса и потерь кинетической энергии, необходимость математической и конструктивной оптимизации размеров зазоров в существующих звеньевых системах, научного обоснования промежуточных элементов, снижающих динамические нагрузки, и разработки



инженерных решений для обеспечения безопасности движения проявляется как актуальная научно-техническая задача.

Различия в закономерностях изменения динамической силы удара (P_{din}) при прохождении колесной пары подвижного состава через рельсовый стык и внутренних температурных напряжений (P_t) в структуре пути наглядно отражаются в полученных графических координатах. Прежде всего, на звеньевых путях при снижении температуры рельса размер конструктивного зазора линейно возрастает до максимального значения (до 22 мм), в результате чего амплитуда вертикальной силы удара, возникающей от соударения колеса с концом рельса при увеличении скорости поезда, резко устремляется вверх по параболической кривой. Напротив, с ростом температуры зазор стремится к нулю, и при превышении температуры поверхности рельса отметки $+60^0$ C зазор полностью закрывается, вызывая критические сжимающие силы и на звеньевом рельсе, что характеризуется переходом кривой, указывающей на риск нарушения устойчивости пути, в опасную зону. В системе бесстыкового пути (CWR) график имеет совершенно иной профиль, где ввиду постоянного равенства величины зазора нулю динамические силы удара, зависящие от скорости, образуют минимальную стабильную линию, однако продольные осевые напряжения внутри рельса резко возрастают вдоль вертикальной оси по мере удаления температурного отклонения от нейтральной точки (температуры фиксации $+20^0$ C). Из графического анализа видно, что при низких зимних температурах бесстыковая рельсовая плетть подвергается колоссальным растягивающим напряжениям (осевое усилие превышает 1000 кН), что увеличивает риск разрыва сварных стыков, тогда как во время аномальной летней жары сжимающие силы стремятся деформировать рельс в боковом направлении (выброс), и этот процесс ограничивается коэффициентом сопротивления шпал и балластной призмы. Таким образом, графические показатели научно доказывают, что если на звеньевых путях основная опасность и эксплуатационные расходы приходятся на механические ударные разрушения при низких температурах, то на бесстыковых путях основное внимание должно быть сосредоточено на поддержании статического равновесия внутренних термических напряжений при высоких и низких температурах с помощью мощных клеммно-болтовых промежуточных креплений, и все эти процессы мы можем видеть на прилагаемом Рисунке 1.

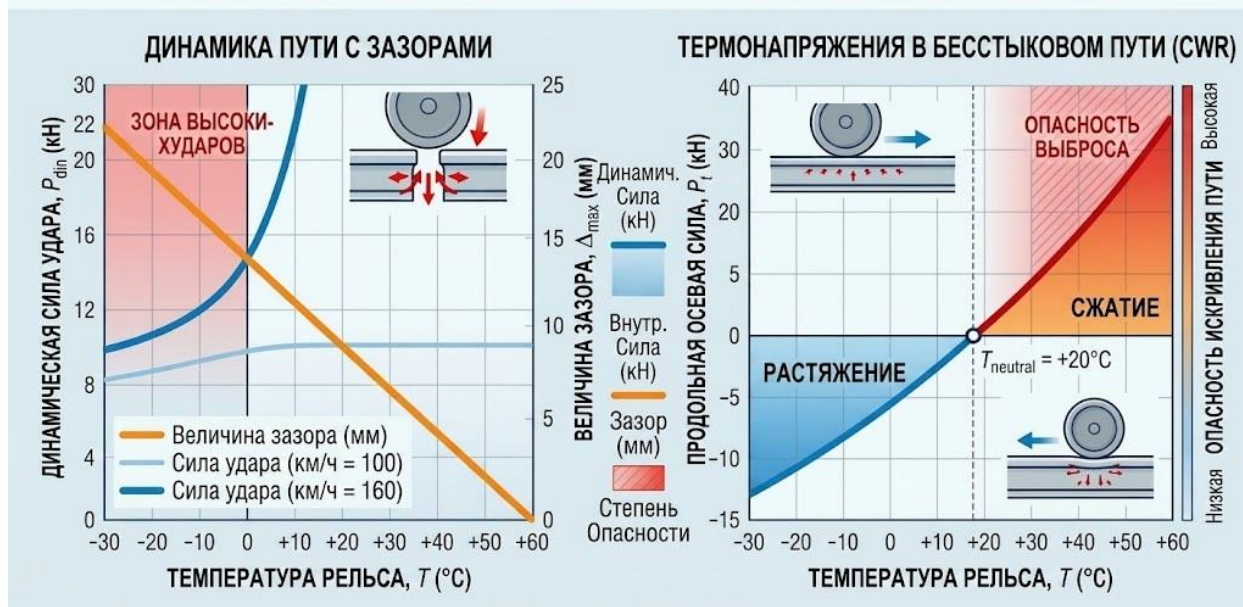
Железнодорожные рельсовые стыки: Оптимизация геометрических неровностей

Рисунок 1. Графики изменения динамических сил удара и продольных осевых напряжений в зависимости от температуры рельсов для звеньевых и бесстыковых путей.

Для устранения геометрических неровностей в элементах рельсовых стыков и минимизации рисков, связанных с температурными деформациями, требуется внедрение комплексных инженерно-технических решений. Прежде всего, с учетом резко континентального климата, в целях повышения безопасности движения на существующих звеньевых путях необходимо внедрить динамический и переменный «Номограмм зазоров», рассчитанный на основе многолетних метеорологических данных каждого региона, а размеры зазоров должны постоянно контролироваться путевыми мастерами с помощью автоматизированных измерительных приборов. Для поглощения динамических сил удара и снижения нагрузки на колеса вагонов целесообразно использовать современные изолирующие стыки из высокопрочных композитных или металлополимерных материалов вместо традиционных стальных накладок, а также сократить расстояние между предстыковыми шпалами (уплотнить шпальную решетку) и применить в этих точках высокоэластичные резинокаучуковые прокладки. На участках бесстыкового пути (CWR) для полного исключения риска выброса пути в летнюю жару и излома рельса в зимний период необходимо отказаться от традиционных клеммно-болтовых креплений КБ и массово внедрить пружинные упругие крепления (например, анкерные промежуточные



скрепления типа APC, Pandrol или Vossloh), которые обеспечивают высокое усилие прижатия и полностью предотвращают продольный угон рельса. Кроме того, в вагонных депо и пунктах технического обслуживания необходимо проводить периодическую шлифовку поверхностей катания колесных пар и оптимизацию профиля колеса для снижения контактно-усталостных нагрузок в точках рельсовых соединений, параллельно внедряя интеллектуальную систему мониторинга неисправностей рельсовых стыков по вибрации вагонов с установкой датчиков IoT (интегрированных с платформами типа Техновизор), что является наиболее эффективным и перспективным решением в отрасли.

В рамках данного исследования были всесторонне проанализированы в научно-практическом аспекте геометрические неровности (зазоры) в зоне рельсовых стыков, являющиеся одним из наиболее уязвимых механических элементов верхнего строения железнодорожного пути, и их влияние на динамику системы «вагон–путь». Полученные результаты математического моделирования и графического анализа показывают, что в условиях резко континентального климата отсутствие оптимизации размеров зазоров на традиционных звеньевых путях в соответствии с температурными изменениями приводит к резкому возрастанию динамических сил удара, действующих на конструкции вагонов, буксовые подшипники и тормозные системы при увеличении скорости поездов, а также вызывает непредвиденные геометрические деформации пути. Хотя внедрение технологии бесстыкового пути (CWR), основанное на опыте развитых стран, является наиболее эффективным решением с точки зрения обеспечения плавности хода вагонов, экономии расхода энергии на 8–12% и минимизации шума и вибрации, сдерживание колоссальных термических напряжений, возникающих из-за аномального перепада температур в нашей республике, требует коренной модернизации инфраструктуры. Исходя из этого, для вывода безопасности движения на железных дорогах на качественно новый уровень актуальной и стратегической задачей отрасли на перспективу остается применение эластично-композитных накладок и современных резиновых прокладок на существующих звеньевых участках, а на бесстыковых линиях — поэтапный переход на пружинные упругие скрепления (APC, Pandrol), полностью ограничивающие смещение рельсов, и интеграция интеллектуальных систем мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



1. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с.
2. Яковлев В. Ф. Бесстыковой путь с упругими промежуточными скреплениями в условиях резко континентального климата. – СПб.: ПГУПС, 2004. – 184 с.
3. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь: Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
4. Кваша С. А., Иванов П. С. Анализ динамического воздействия колес подвижного состава на рельсовые стыки // Вестник ВНИИЖТ. – 2018. – № 3. – С. 45–51.
5. Карпущенко Н. И. Надежность и безопасность железнодорожного пути в экстремальных температурных условиях. – Новосибирск: СГУПС, 2012. – 215 с.
6. Бороненко Ю. П., Цыганская Л. В. Влияние геометрических неровностей рельсовой колеи на динамические показатели грузовых вагонов нового поколения // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 2 (93). – С. 38–43.
7. Левинзон М. А. Содержание и ремонт бесстыкового пути: Практическое пособие. – М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – 160 с.
8. Esveld C. Modern Railway Track (2nd Edition). – MRT Productions, 2001. – 654 p.