

О взаимодействии пути и подвижного состава на участках скоростного движения в зависимости от очертания профилей рельсов и колес

А. Ю. Абдурашитов¹, Ю. Н. Юркова²✉

¹Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «Российские железные дороги», г. Москва, Российская Федерация

²Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

✉ y.lenin@bk.ru

Резюме

В статье представлены результаты анализа проблемных вопросов по взаимодействию в системе «колесо – рельс». Рассмотрены основные виды контактов колес и рельсов, в частности одноточечный и конформный. Отмечается, что колесам и рельсам такой профиль можно придавать в процессе текущего содержания, а рельсы могут профилироваться сразу после укладки в путь. Приводятся данные по измерению профилей рельсов на участках скоростного движения и колес поездов «Сапсан» и «Ласточка», а также расчетов по определению сил и напряжений при взаимодействии подвижного состава и пути на выбранных участках скоростного движения (Горьковская железная дорога) и высокоскоростного движения (Октябрьская железная дорога). Оценивается влияние очертания поперечного профиля рельсов и профиля новых и изношенных колес поездов «Сапсан» и «Ласточка» на уровень их взаимодействия, при этом принимается во внимание подуклонка рельсов и ширина колес. На основании результатов моделирования проводится анализ сил и напряжений в контакте «колесо – рельс» в зависимости от очертания поверхности катания колес и рельсов. Приводятся значения эквивалентной конусности при взаимодействии в системе «колесо – рельс» на участках высокоскоростного и скоростного движения. На основании полученных результатов сделаны выводы о рекомендуемых скоростях движения на исследуемых участках пути. Показано, что результаты моделирования послужат базой для разработки плана мероприятий по оптимизации очертания профилей колес и рельсов и позволят внести корректировки в систему их технического обслуживания.

Ключевые слова

скоростное движение, очертание профилей рельсов, взаимодействие пути и подвижного состава, износ рельсов, прокат колес, контактное давление, вертикальные силы, техническое обслуживание рельсов и колес

Для цитирования

Абдурашитов А. Ю. О взаимодействии пути и подвижного состава на участках скоростного движения в зависимости от очертания профилей рельсов и колес / А. Ю. Абдурашитов, Ю. Н. Юркова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).170-177

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 18.01.2022 г.; принята к публикации: 19.01.2022 г.

On the interaction of track and rolling stock on high-speed sections depending on the shape of rail and wheel profiles

A. Yu. Abdurashitov¹, Yu. N. Yurkova²✉

¹Infrastructure Design Bureau – branch of JSC «Russian Railways», Moscow, the Russian Federation

²Russian University of transport (MIET), Moscow, the Russian Federation

✉ y.lenin@bk.ru

Abstract

The results of the analysis of problematic issues in the «wheel-rail» system interaction are presented. The main types of wheel and rail contacts are considered, including single-point and conformal ones. It is noted that such a profile can be given to wheels and rails in the process of current maintenance, while rails can be profiled immediately after having been laid in the track. The measurement data of rail profiles on the sections of high-speed traffic and wheels of the «Sapsan» and «Lastochka» trains are presented as well as calculations for determining forces and stresses during the interaction of rolling stock and track on selected sections of a speed traffic (Gorkiy railway) and a high-speed traffic (Oktyabrskaya railway). The influence of the outline of the transverse profile of rails and the profile of new and worn wheels of the «Sapsan» and «Lastochka» trains on the level of their interaction is estimated, while taking into account the slope of the rails and the width of the track. Based on the simulation results, the forces and stresses in the wheel-rail contact patch are evaluated depending on the shape of the rolling surface of the wheels and rails. The results of the evaluation of the equivalent taper during the interaction in the «wheel-rail» system on the sections of high-speed and speed traffic are presented. Based on the results obtained, conclusions are drawn about the recom-

mended speeds of movement on the surveyed sections of the track. It is shown that the simulation results may serve as a basis for the development of an action plan to optimize the shape of the profiles of wheels and rails and allowing adjustments to be made to their maintenance system.

Keywords

high-speed traffic, the outline of the profile rails, interaction of track and rolling stock, the wear of the rails, wheel rental, contact pressure, vertical force, maintenance of rails and wheels

For citation

Abdurashitov A. Yu., Yurkova Yu. N. O vzaimodeystvii puti i podvizhnogo sostava na uchastkakh skorostnogo dvizheniya v zavisimosti ot ochertaniya profilei rel'sov i koles [On the interaction of track and rolling stock on high-speed sections depending on the shape of rail and wheel profiles]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).170-177

Article Info

Received: 12.01.2022; revised: 18.01.2022; accepted: 19.01.2022.

Введение

В рамках статьи рассматриваются оценка взаимодействия в системе «колесо – рельс» на участках скоростного движения, а также влияние на параметры взаимодействия пути и подвижного состава различных факторов (подуклонка рельсов, ширина колеи, очертание профилей колес и рельсов).

Для улучшения взаимодействия пути и подвижного состава следует предпринять меры по определению фактически существующих условий эксплуатации, исходя из которых можно разработать нормы по текущему содержанию, обслуживанию и ремонту технических средств железнодорожного транспорта с учетом рентабельности на длительную перспективу.

Анализ отечественного и мирового опыта позволяет сделать вывод о том, что очертание профилей колеса и рельса – наиболее важный фактор, который влияет на эффективность при взаимодействии пути и подвижного состава. Также он действует на интенсивность изнашивания и контактно-усталостные повреждения колес и рельсов, на срок их службы и безопасность движения [1–7].

В системе «колесо – рельс» основной проблемой является уменьшение уровня их взаимодействия, в том числе снижение уровня трения. Однако для обеспечения движения силы тяги требуется, чтобы значения силы трения были достаточными.

Высокие требования предъявляются к материалам конструкции по прочности, износостойкости и контактной выносливости.

Величина неровностей на поверхности рельсов и колес не должна препятствовать реализации высоких скоростей движения, особенно актуально это при скоростях выше 200 км/ч.

Как российские, так и зарубежные специалисты большое внимание уделяли взаимодействию в системе «колесо-рельс» [8–11].

При движении подвижного состава по рельсовому пути возможны три основных вида контакта колеса и рельса:

1. Поверхность катания колеса контактирует с рельсом в центральной области его головки. Такой вид контакта характерен для прямых участков пути и кривых очень большого радиуса.

2. Одно из колес контактирует с возвышенным наружным рельсом в кривой в переходной зоне поверхности катания (поблизости от рабочей выкружки, но не непосредственно на ней), другое колесо контактирует с внутренним рельсом в центральной области его головки. Такой вид контакта характерен для достаточно пологих кривых.

3. Одно из колес контактирует с возвышенным наружным рельсом в кривой на его рабочей выкружке, другое колесо контактирует с внутренним рельсом в центральной области его головки. Такой контакт характерен для кривых малого радиуса.

Фактические условия контакта колеса и рельса в эксплуатации могут стать значительно разнообразнее и значительно сложнее. Для того чтобы улучшить характер этого взаимодействия, требуется оценка реальных условий эксплуатации и на этом основании разработка нормативов по техническому обслуживанию (текущему содержанию и ремонту) путевой инфраструктуры с учетом стоимости ее жизненного цикла.

Ухудшение контактирования колес и рельсов вследствие износа рельсов, проката колес, смещения дорожки контакта приводит к

уменьшению их срока службы. Управлять этим процессом возможно за счет проведения периодического шлифования рельсов и обточки колес. Это позволяет существенно отдалить образование контактно-усталостных дефектов как рельсов, так и колес.

Необходимо разработать взаимоувязанные профили колес и рельсов с учетом классификации линии (скоростное, тяжеловесное движение, совмещенная эксплуатация и т.д.).

По результатам проведенных аналитических расчетов получены значения сил и напряжений при взаимодействии подвижного состава и железнодорожного пути реального очертания с учетом отклонений показателей подуклонки рельсов (наклона поверхности катания головки рельсов от номинального показателя (1/12 и 1/60) при различных скреплениях (клеммно-болтовое, железобетонное рельсовое и анкерное рельсовое), участков пути в прямых и разного радиуса кривых участках, с учетом воз-

вышения рельсов и износа головки рельса). По итогам анализа результатов эксперимента и натурных измерений (рис. 1), получены величины допустимых при эксплуатации параметров подуклонки, а также наклона поверхности катания головки рельсов. По результатам математического моделирования взаимодействия экипажа и пути получены значения максимальных напряжений в контакте «колесо – рельс» при изменении подуклонки (рис.2).

При анализе работы узла скреплений шпал на линии Нижний Новгород – Москва проводилось исследование подуклонки рельсов.

По полученным результатам установлено, что причинами отступлений подуклонки рельсов в пути от нормативных требований являлись:

– отступление подуклонки подрельсовых площадок железобетонных шпал в процессе производства от требований Норм безопасности на железнодорожном транспорте 017-93;

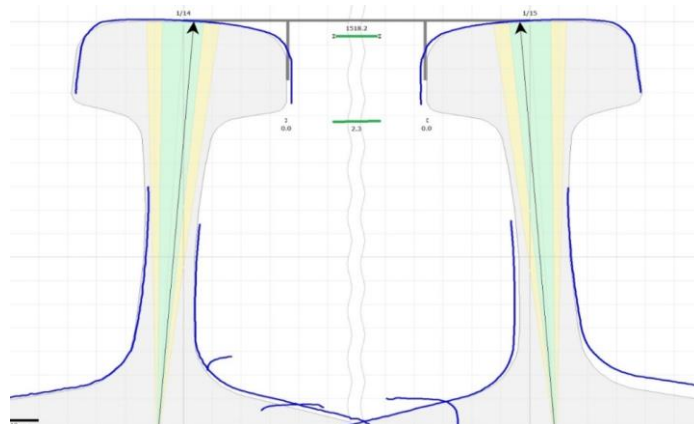


Рис. 1. Зависимость подуклонки рельсов от ширины колеи на участке скоростного движения (Подуклонка левого рельса 1/14, правого – 1/15, ширина колеи – 1°518,2 мм)

Fig. 1. Dependence of the rail canting on the track width in the section of speed traffic (The slope of the left rail is 1/14, the right one is 1/15, the track width is 1°518.2 mm)

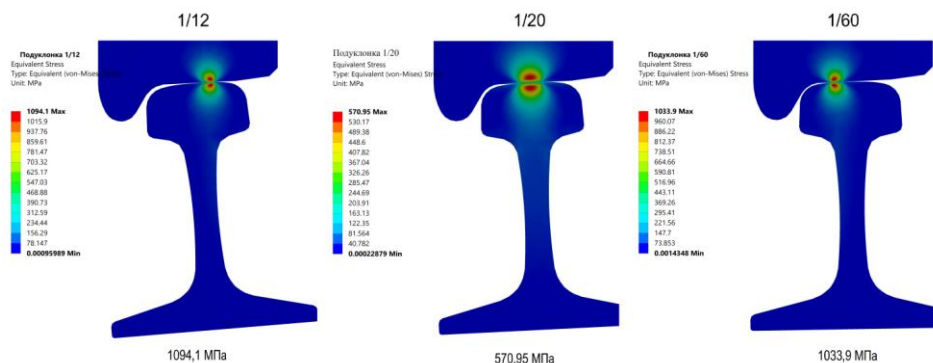


Рис. 2. Значения максимальных напряжений, МПа при изменении подуклонки

Fig. 2. Values of maximum stresses, MPa when changing the canting



Рис.3. Измерение профиля колеса скоростного поезда «Ласточка»
 Fig. 3. Measurement of the wheel profile of «Lastochka» high-speed train

Замеры колесных пар электропоезда ТУ-18														ЗС2Г		061		vi		22.10.2020		Заказ-наряд: D1096307 пробег на момент замера (км) 523 694			
Сечение (вагон)	№к. п.	заб. пункт	высота гребня		прокат		толщина гребня		параметр крутизны гребня		Уширение обода		диаметр обода		Разница диаметров		Допуски по разнице диаметров (мм)								
			левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	на к.п.	на тележке	на вагоне	на к.п.	на тележке	на вагоне					
01	1	00173	32,9	33,3	2,9	3,3	28,3	28,5	6,5	6,8	0,6	0,7	867,1	866,6	0,5	2,6	4,5	1,2	5,0	15,0	5,0	30,0			
	2	00523	32,9	33,0	2,9	3,0	30,9	29,5	8,4	7,3	0,7	0,7	869,2	868,8	0,4										
02	1	00387	32,6	32,8	2,6	2,8	29,5	29,3	7,6	7,4	0,5	0,3	871,1	870,6	0,5	1,0	1,1	0,8	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0		
	4	00377	32,6	32,9	2,6	2,9	30,3	28,8	8,6	6,8	0,4	0,4	870,8	870,1	0,7										
03	1	00462	31,5	31,8	1,5	1,8	29,3	30,1	6,9	7,4	0,4	0,4	918,4	917,7	0,7	5,6	15,0	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	2	00208	31,4	31,6	1,4	1,6	30,6	30,2	8,2	7,8	0,3	0,4	918,5	918,1	0,4										
04	1	00158	31,1	31,4	1,1	1,4	29,6	30,3	7,2	7,6	0,3	0,2	918,8	918,3	0,5	11,4	8,6	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	4	00789	31,2	31,3	1,2	1,3	29,9	29,9	7,3	7,6	0,3	0,4	918,6	918,4	0,2										
05	1	00375	30,5	30,2	0,5	0,2	28,9	29,0	8,2	7,6	-0,5	-0,5	893,2	893,4	0,2	8,2	8,6	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	2	00438	30,7	31,1	0,7	1,1	29,8	28,9	8,0	7,4	-0,5	-0,4	898,8	898,3	0,5										
06	1	00582	30,6	31,0	0,6	1,0	29,0	29,6	6,5	7,4	-0,5	-0,5	895,2	894,5	0,7	11,4	8,6	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	4	00451	30,7	31,0	0,7	1,0	29,3	29,5	6,6	6,9	-0,5	-0,5	884,5	883,8	0,7										
07	1	03149	30,2	30,2	0,2	0,2	30,8	30,6	8,6	8,4	0,3	0,2	911,6	911,3	0,3	8,2	8,6	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	2	02107	31,0	31,1	1,0	1,1	30,1	28,9	7,5	6,4	0,3	0,3	919,5	919,1	0,4										
08	1	02121	31,2	31,0	1,2	1,0	29,6	30,1	7,3	7,7	0,2	0,3	918,5	918,7	0,2	1,4	8,6	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	4	02104	31,1	30,8	1,1	0,8	28,7	28,8	6,2	6,4	0,3	0,2	919,1	919,9	0,8										
09	1	00224	32,3	32,4	2,3	2,4	28,9	29,6	7,2	7,0	0,4	0,5	873,7	873,3	0,4	0,9	4,2	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	2	00119	31,2	31,2	1,2	1,2	29,9	29,0	8,0	7,2	0,4	0,4	874,2	874,2	0,0										
10	3	00521	32,0	31,7	2,0	1,7	29,4	31,0	7,5	8,4	0,3	0,3	877,2	877,5	0,3	0,7	4,2	0,8	2,6	11,4	4,3	15,0			
	4	00527	32,3	32,1	2,3	2,1	28,5	29,4	6,7	7,3	0,1	0,4	876,8	876,9	0,1										

ДОПУСКИ НА КОЛЕСНЫХ ПАРАХ									
ВЫСОТА ГРЕБНЯ	ПРОКАТ	ТОЛЩИНА ГРЕБНЯ	КРУТИЗНА	Уширение обода	диаметр обода				
МИН 28,0		МИН 28,0	МИН 6,0	МАКС 3,0	мин 840,0				
МАКС 35,0	МАКС 5,0	МАКС 34,0							

параметры на составе									
Наиб выс. гребня	Наиб прокат	Наим. гребня	Наим. гребня	Наиб. крут-на	Уширение обода	Мин. диаметр			
33,3	3,3	28,3	31,0	6,2	8,6	866,6			

Рис. 4. Результаты измерений профилей колес скоростных поездов «Ласточка»
 Fig. 4. The results of measuring the profiles of the wheels of «Lastochka» high-speed train

- разнонаправленная скрученность рельсов в зоне сварных рельсовых стыков;
 - образование остаточных деформаций прокладок-амортизаторов от действия поездной нагрузки, которое приводит к разной толщине прокладок и изменению подуклонки;
 - разница моментов затяжки внутренних и наружных клеммных болтов, определяющая различия в продольных усилиях поджатия рельсов к шпалам и изменение подуклонки;
 - изменение подуклонки рельсов от поездной нагрузки за счет упругости скреплений.
- На рис. 3 показаны очертания профилей колес поезда, а на рис. 4 – результаты измерений.

Для снижения износа в современной практике пришли к созданию профилей, у которых поверхность катания обладает не постоянными значениями конусности, а выполняется чередованием окружностей, которые имитируют различную степень износа, близкую к возникающей в период приработки колес [12–15].

Интенсивность износа у рельсов и колес с таким профилем существенно ниже, чем у стандартных.

Рассмотрим основные виды контактов колес и рельсов с учетом исследований [16–18].

Непосредственно на площадке контакта металл колеса и рельса находится под высоким

давлением, действующим со всех направлений, так как контактное давление поддерживается реакциями со стороны окружающего материала.

Интенсивный одноточечный контакт основания гребня колеса и рабочей выкружки рельса приводит к возникновению наклонных параллельных трещин или выкрашиванию металла головки рельса.

Интенсивный «выпуклый» контакт наиболее высокой точки профиля рельса и колеса может вызвать пластическое течение и выкрашивание металла в центральной части поверхности катания рельса и / или колеса.

Поперечное проскальзывание колеса относительно рельса в кривых имеет место при неудовлетворительном вписывании ходовой части подвижного состава в рельсовую колею. Силы, действующие поперек площадки контакта в результате проскальзывания или микроскольжения, вызывают деформацию элементов металла под площадкой контакта. При этом нарушается благоприятная картина давлений и напряжений в элементе, что вызывает течение металла и приводит к неравномерному изнашиванию поверхности катания рельса и деформациям в виде волнообразного износа или большого перемещения металла.

Недостаточный контроль за профилем контактирующих тел приводит к уменьшению размера и изменению формы площадки контакта, что вызывает интенсификацию напряжений, течение металла и возникновение контактно-усталостных повреждений. Наличие дефектов в металле рельса или колеса в зоне интенсивных контактных напряжений усугубляет данные условия.

В случае движения в прямых участках пути контактирование колеса и рельса происходит в основном в средней части на поверхности катания. Расположение зоны контакта в узкой части центральной зоны прежде всего может проявляться в случае сочетания колеса с коническим профилем обода и с профилем рельсов с большой кривизной и в наименьшей степени при колесах с таким же профилированным ободом при так называемых плоских рельсах. Полоса же контакта наиболее явно выражена при стабильном состоянии ширины рельсовой колеи. Следует избегать двухточечного контакта между колесом и рельсом в прямых участках, так как он приводит к контакту по-

верхностей со значительно увеличенной конусностью и неустойчивому движению экипажа.

Одноточечный контакт

Анализ показал, что одноточечные контакты наносят наиболее ощутимые повреждения как подвижному составу, так и пути. Значительные контактные напряжения, которые имеют место при интенсивном проскальзывании, приводят к усталостным повреждениям рельсов.

И тем не менее одноточечный контакт считается приемлемым для прямых участков пути, так как трудно представить, что имеющие место в данном случае малые углы набегания могут привести к значительному износу и изменению первоначального профиля колеса. В целом такие условия привели бы к уменьшению конусности и повышению степени устойчивости движения подвижного состава в прямых участках пути.

Однако даже при самом благоприятном случае вероятно появление параллельных трещин на поверхности катания головки рельса, а в самом неблагоприятном – разрушение рельса из-за интенсивного продольного проскальзывания, вызывающего течение материала рельса, а также неустойчивости движения подвижного состава, которое выражается в вилянии, в результате чего боковой износ рельсов значительно ускоряется.

Одноточечный контакт появляется прежде всего вследствие:

- неверного расчета очертания профилей колес и рельсов;
- сплющивания поверхности катания головки рельса в процессе эксплуатации;
- чрезмерного неконтролируемого проката поверхности катания колеса.

Конформный контакт

Конформный контакт возникает по мере эксплуатации при износе рабочей выкружки рельса и гребня колеса вследствие интенсивного гребневого контакта в кривых участках пути. Данный профиль приблизительно одинаков даже при различных условиях гребневого контакта.

Про конформный контакт можно отметить, что относительное проскальзывание приводит к увеличению зоны контакта, при этом удельное давление уменьшается, но имеет место течение материала.

Профили рельсов и колес, изношенных до соответствующей конформному контакту конфигураций, могут успешно ее сохранять и показывать достаточно хорошую работоспособность по усталостной долговечности.

Профиль этого типа имеет ряд преимуществ, которые заключаются в следующем:

- сохраняется конфигурация;
- усталость рельса находится под контролем;
- конусность колес имеет нейтральный характер, т. е. они не приобретают большую конусность в отличие от одноточечного контакта.

Таким образом, можно рекомендовать, чтобы профили колес и рельсов были конформными. И колесам, и рельсам такой профиль следует придавать в процессе текущего обслуживания – рельсы могут шлифоваться сразу после укладки в путь.

При разработке конформного профиля важно учесть следующие моменты:

- радиусы и длины дуг профиля;
- контакт по касательной при слиянии этого профиля с профилем поверхности катания колеса, чтобы гарантировать минимальную возможность двухточечного контакта между поверхностью катания и гребнем;
- допустима некоторая свобода при выборе угла наклона гребня для соответствия существующим стандартам текущего содержания;
- радиусы рабочей грани рельса должны следовать профилю гребня и плавно переходить в профиль поверхности катания головки рельса, избегая возникновения двухточечного контакта между рельсом и колесом.

Проведено моделирование системы «колесо – рельс» для различных сочетаний профилей:

- рельсы и колеса неизношенные;
- рельс изношенный – колесо неизношенное;
- колесо изношенное – рельс неизношенный;
- колесо изношенное – рельс изношенный.

Полученные результаты послужат основой для разработки плана мероприятий по оптимизации профилей «колесо – рельс» (рис. 5).

Для реальных условий эксплуатации проведена оценка показателей эквивалентной конусности при сочетании новых и изношенных профилей колес «Р8 Сапсан» и рельсов типа Р65 (табл.).

Таким образом, контактирование изношенного колеса «Р8 Сапсан» с новым рельсом Р65 недопустимо в связи с рисками возникновения дополнительных колебаний и раскачиваний экипажа.

Заключение

Главный фактор, определяющий величину напряжений в контакте «колесо-рельс» – радиусы поверхности катания рельсов и колес: чем больше отклонение этих радиусов от проектных значений, тем больше увеличиваются напряжения.

Определены допустимые при эксплуатации на участке скоростного движения параметры подуклонки и наклона поверхности катания рельсов.

Для оптимизации профилей колеса и рельса по контактными напряжениям даются

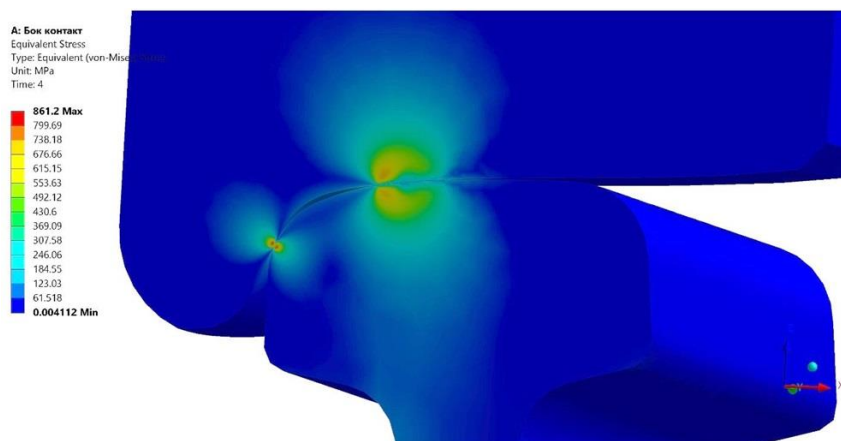


Рис.5. Результаты моделирования контактирования вагонного колеса поезда «Ласточка» и рельса на участке скоростного движения

Fig. 5. The results of modeling the contact of the «Lastochka» train car wheel and the rail in the section of high-speed traffic

Значения эквивалентной конусности сочетаний новых и изношенных профилей колес
«Р8 Сапсан» и рельса типа Р65

Values of the equivalent taper of combinations of new and worn profiles of wheels
«R8 Sapsan» and rail type R65

Характеристика Characteristic	Новое колесо «Р8 Сапсан» – новый рельс Р65 New wheel «R8 Sapsan» – new rail R65	Новое колесо «Р8 Сапсан» – изношенный рельс Р65 New wheel «R8 Sapsan» – worn rail	Изношенное колесо «Р8 Сапсан» – новый рельс Р65 Worn wheel «R8 Sapsan» – new rail R65	Изношенное колесо «Р8 Сапсан» – изношенный рельс Р65 Worn wheel «R8 Sapsan» – worn rail R65»
Эквивалентная конусность Equivalent taper	0,123	0,125	0,363	0,023
Устойчивое движение со скоростью до 250 км/ч Sustainable motion at the speed of 250 km/h	Обеспечивается provided	Обеспечивается provided	не обеспечивается not provided	Обеспечивается provided

следующие рекомендации:

– не допускать контактных напряжений, значения которых превышают предел прочности рельсового металла на сдвиг;

– за счет своевременной обточка профиля колеса и шлифовки головки рельса распределять точки контакта по поверхностям катания колеса и рельса.

Список литературы

1. Коган А.Я., Абдурашитов А.Ю., Полещук И.В. Дополнительные требования к прямолинейности рельсов в зоне стыков // Железные дороги мира. 2003. № 3. С. 66–71.
2. Коган А.Я., Пейч Ю.Л. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2000. № 2. С. 31–39.
3. Горячева И.Г., Захаров С.М., Коган А.Я. и др. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения // Бюл. Объедин. ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 5-6. С. 16–26.
4. Погорелов Д.Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» // Вестн. компьютер. и информац. технологий. 2005. № 4. С. 27–34.
5. Оценка эволюции профилей колёс железнодорожного экипажа на основе применения трибодинамической модели / С.М. Захаров, И.Г. Горячева, Д.Ю. Погорелов и др. // Тяжёлое машиностроение. 2007. № 3. С. 19–24.
6. Лисицын А.И., Абдурашитов А.Ю. О взаимодействии в системе «колесо-рельс» на участках высокоскоростного движения // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 3. С. 2–6.
7. Абдурашитов А.Ю. О влиянии особенностей профилей колес и рельсов на их взаимодействие // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 11. С. 2–7.
8. Программный комплекс «Универсальный механизм» // Лаборатория вычислительной механики : сайт. URL: <http://www.umlab.ru> (Дата обращения: 27.12.2021).
9. Алехин А.Л. Прогнозирование одиночного выхода рельсов, сваренных алюминотермитным способом // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2010. № 2 (23). С. 51–56.
10. Аманова М.В. Оценка суммарного одиночного выхода рельсов при обращении по ним разнотипного подвижного состава // Промышленный транспорт Казахстана. 2012. № 3. С. 14–18.
11. Интенсивность накопления остаточных деформаций пути при воздействии вагонной нагрузки 250 кН/ось. Ленингр. ин-т инж. ж.-д. трансп / С.В. Амелин, Л.С. Блажко, М.П. Смирнов и др. Л. : 1982. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 30.08.82, № 1797-жд.
12. Бельтюков В.П. Планирование ремонтов пути в условиях интенсивной его эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. Л., 1990. 275 с.
13. Бельтюков В.П. Разработка методик прогнозирования технического состояния пути, затрат на содержание пути и оптимизации содержания пути по экономическим критериям // Путь XXI века : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2012. С. 25–32.
14. Бельтюков В.П. Среднесрочное планирование работ по ремонту верхнего строения пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 2. С. 23–25.
15. Блажко Л.С. Техничко-технологическая оценка усиления конструкции пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН : дис. ... д-ра тех. наук. СПб., 2003. 331 с.
16. Сенникова А.В. Влияние скорости движения поездов на одиночный выход рельсов в пути // Путь XXI века : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2013. С. 82–84.
17. Куклин С.А. Контактные задачи при качении // Современные проблемы теории машин : материалы II Междунар. заоч. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2014. С. 33–40.
18. Сычев В.П. Методы оценивания железнодорожного пути характеристиками случайных процессов // Наука и техника транспорта. 2007. №3. С. 84–88.

References

1. Kogan A.Ya., Abdurashitov A.Yu., Poleshchuk I.V. Dopolnitel'nye trebovaniya k pryamolineinosti rel'sov v zone stykov [Additional requirements for the straightness of rails in the joint zone]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2003, no 3, pp. 66–71.
2. Kogan A.Ya., Pech Yu.L. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktivnykh puti v zone styka rel'sov [Calculation of the stress-strain state of track structural elements in the rail junction zone]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 2000, no 2, pp. 31–39.
3. Goryacheva I.G., Zakharov S.M., Kogan A.Ya., Torskaya E.V., Shur E.A., Abdurashitov A.Yu., Borts A.I., Zagranichnik K.L. Kompleksnyi podkhod k prognozirovaniyu rabotosposobnosti i resursa rel'sov novogo pokoleniya [Integrated approach to the prediction of performance and resource rails new generation]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO «RZHD»* [Bulletin of the joint scientific Council of JSC «RZHD»]. 2017, no 5–6, pp. 16–26.
4. Pogorelov D.Yu. Komp'yuternoe modelirovaniye dinamiki tekhnicheskikh sistem s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa «Universal'nyy mekhanizm» [Computer simulation of the dynamics of technical systems using software package «Universal mechanism»]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Bulletin of Computer and Information Technologies]. 2005, no 4, pp. 27–34.
5. Zakharov S.M., Goryacheva I.G., Pogorelov D.Yu., Yazykov V.N., Zharov I.A., Torskaya E.V., Soshnikov S.N., Prozorov Ya.S. Otsenka evolyutsii profili koles zheleznodorozhnogo ekipazha na osnove primeneniya tribodinamicheskoi modeli [Evaluation of the evolution of the railway carriage wheel profiles based on the application of the tribodynamic model]. *Tyazheloe mashinostroeniye* [Heavy Engineering]. 2007, no 3, pp. 19–24.
6. Lisitsyn A.I., Abdurashitov A.Yu. O vzaimodeystvii v sisteme «koleso – rel's» na uchastkakh vysokoskorostnogo dvizheniya [About interaction in the «wheel-rail» system on high-speed traffic sections]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities]. 2020, no 3, pp. 2–6.
7. Abdurashitov A.Yu. O vliyaniy osobennosti profili koles i rel'sov na ikh vzaimodeystvie [On the influence of the features of the profiles of wheels and rails on their interaction]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities]. 2015, no 11, pp. 2–7.
8. Programmnyi kompleks «Universal'nyy mekhanizm» (Elektronnyi resurs) [Software package «Universal mechanism» (Electronic resource)]. Available at: <http://www.umlub.ru> (Accessed December 27, 2021).
9. Alyokhin A.L. Prognozirovaniye odinochnogo vykhoda rel'sov, svarennykh alyuminotermityem sposobom [Prediction of a single output of rails welded by the aluminothermic method]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Petersburg Transport University]. 2010, no 2(23), pp. 51–56.
10. Amanova M.V. Otsenka summarnogo odinochnogo vykhoda rel'sov pri obraschenii po nim raznotipnogo podvizhnogo sostava [Evaluation of the total single output of rails when handling different types of rolling stock on them]. *Promyshlennyy transport Kazakhstana* [Industrial transport of Kazakhstan]. 2012, no 3, pp. 14–18.
11. Amelin S.V., Blazhko L.S., Smirnov M.P., Smirnov V.I. Intensivnost' nakopleniya ostatochnykh deformatsii puti pri vozdeystvii vagonnoi nagruzki 250 kN/os' [The intensity of the accumulation of residual deformations of the way when exposed to a wagon load of 250 kN/axle]. Leningrad. in-ting. W.-D. transp. L., 1982. DEP. in TSNIITEI MPS 30.08.82. No 1797-rail.
12. Belyukov V.P. Planirovaniye remontov puti v usloviyakh intensivnoi ego ekspluatatsii [Planning of track repairs in conditions of intensive operation]. Ph.D's thesis. Leningrad, 1990. 275 p.
13. Belyukov V.P. Razrabotka metodik prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti, zatraty na sodержanie puti i optimizatsii sodержaniya puti po ekonomicheskim kriteriyam [Development of methods for forecasting the technical condition of the track, the costs of maintaining the track and optimizing the maintenance of the track according to economic criteria]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Put' XXI veka»* [Proceedings of the scientific and practical conference «The Path of the XXI century»]. Saint Petersburg, 2012, pp. 25–32.
14. Belyukov V.P. Srednesrochnoe planirovaniye rabot po remontu verkhnego stroeniya puti [Mid-term planning of work on the repair of the upper structure of the track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and path facilities]. 2013, no 2, pp. 23–25.
15. Blazhko L.S. Tekhniko-tekhnologicheskaya otsenka usileniya konstruktivnykh puti na uchastkakh obrashcheniya podvizhnogo sostava s osevyimi nagruzkami do 300 kN [Technical and technological assessment of the strengthening of the track structure on the sections of rolling stock circulation with axial loads up to 300 kN]. Doctor's thesis. Saint Petersburg, 2003. 331 p.
16. Sennikova A.V. Vliyaniye skorosti dvizheniya poezdov na odinochnyy vykhod rel'sov v puti [The influence of train speed on a single rail exit in the way]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Put' XXI veka»* [Proceedings of international scientific and practical conference «Path of the XXI century»]. Saint Petersburg Transport University, 2013, pp. 82–84.
17. Kuklin S.A. Kontaknyye zadachi pri kachenii [Contact problems in rolling]. *Materialy II Mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennyye problemy teorii mashin»* [Materials of the II International correspondence scientific and practical conference «Modern problems of machine theory»]. Saint Petersburg, 2014, pp. 33–40.
18. Sychev V.P. Metody otsenivaniya zheleznodorozhnogo puti kharakteristikami sluchainykh protsessov [Methods of evaluating the railway track by the characteristics of random processes]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technic of the transport]. 2007, no 3, pp. 84–88.

Информация об авторах

Абдурашитов Анатолий Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела рельсов, проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «РЖД», г. Москва, e-mail: abdran@yandex.ru
Юркова Юлия Николаевна, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, e-mail: y.lenin@bk.ru

Information about the authors

Anatolii Yu. Abdurashitov, Ph.D in Engineering Science, Associate Professor, head of rail department, Infrastructure Design Bureau – branch of JSC «Russian Railways», Moscow, e-mail: abdran@yandex.ru
Yuliya N. Yurkova, Ph.D. Student of Department «Path and path facilities», Russian University of transport (MIET), Moscow, e-mail: y.lenin@bk.ru