

Контактно-усталостные дефекты на поверхности катания внутренних рельсов в кривых малого радиуса



В. С. Коссов,
д-р техн. наук,
профессор, генеральный
директор АО «Научно-
исследовательский
и конструкторско-
технологический
институт подвижного
состава» (АО «ВНИКИ»),



О. Г. Краснов,
д-р техн. наук, заведующий
отделом пути
и специального подвижного
состава отделения
динамики и прочности
подвижного состава
и инфраструктуры
АО «ВНИКИ»,



М. Г. Акашев,
канд. техн. наук,
ведущий инженер
АО «ВНИКИ»,



Н. М. Никонова,
ведущий программист
АО «ВНИКИ»

Одной из наиболее серьезных проблем рельсового хозяйства ОАО «РЖД» является контактно-усталостное выкрашивание. На поверхности катания рельсов на внутренних нитях в кривых радиусом 350–450 м возникают сплошные выкрашивания (код дефекта 19) протяженностью от 20 до 100 м на рельсах ДТ350 после пропущенного тоннажа 40–60 млн т брутто. Это определяет контролене-пригодность рельсовых плетей на этих участках.

Общие условия зарождения и развития поверхностных трещин при повторно-переменном нагружении, включающие стадии их развития в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений и различные подходы к моделированию роста поверхностных усталостных трещин, рассмотрены как в зарубежных, так и отечественных исследованиях [1–13].

Имеется ряд критериев зарождения поверхностной трещины в разных режимах. В настоящем исследовании использовался критерий [5], основанный на подходах механики контактного взаимодействия и включающий определение амплитудных значений максимальных эквивалентных напряжений в условиях циклического нагружения поверхностных и подповерхностных слоев рельса и расчет функции поврежденности с использованием закона накопления повреждений для экспериментального опре-

деления механических характеристик данного материала рельса [4–8].

На функцию накопления поврежденности в значительной степени влияет износ поверхности рельса, в результате которого удаляется поврежденный слой. В связи с этим расчет контактно-усталостной повреждаемости проводился с учетом эволюции (износа) поперечного профиля внутреннего рельса. На каждой итерации вычисляется накопленная поврежденность для узлов, расположенных в плоскости симметрии конечно-элементного фрагмента. Затем в этих узлах определяют число циклов до появления выщербин усталостного характера путем суммирования повреждений по каждой итерации.

Факторами, оказывающими влияние на возникновение поверхностных контактно-усталостных повреждений рельсов, помимо механических свойств рельсовых сталей, являются характер вписывания тележки и ее колесных пар в кривые, профили колес и рельсов,



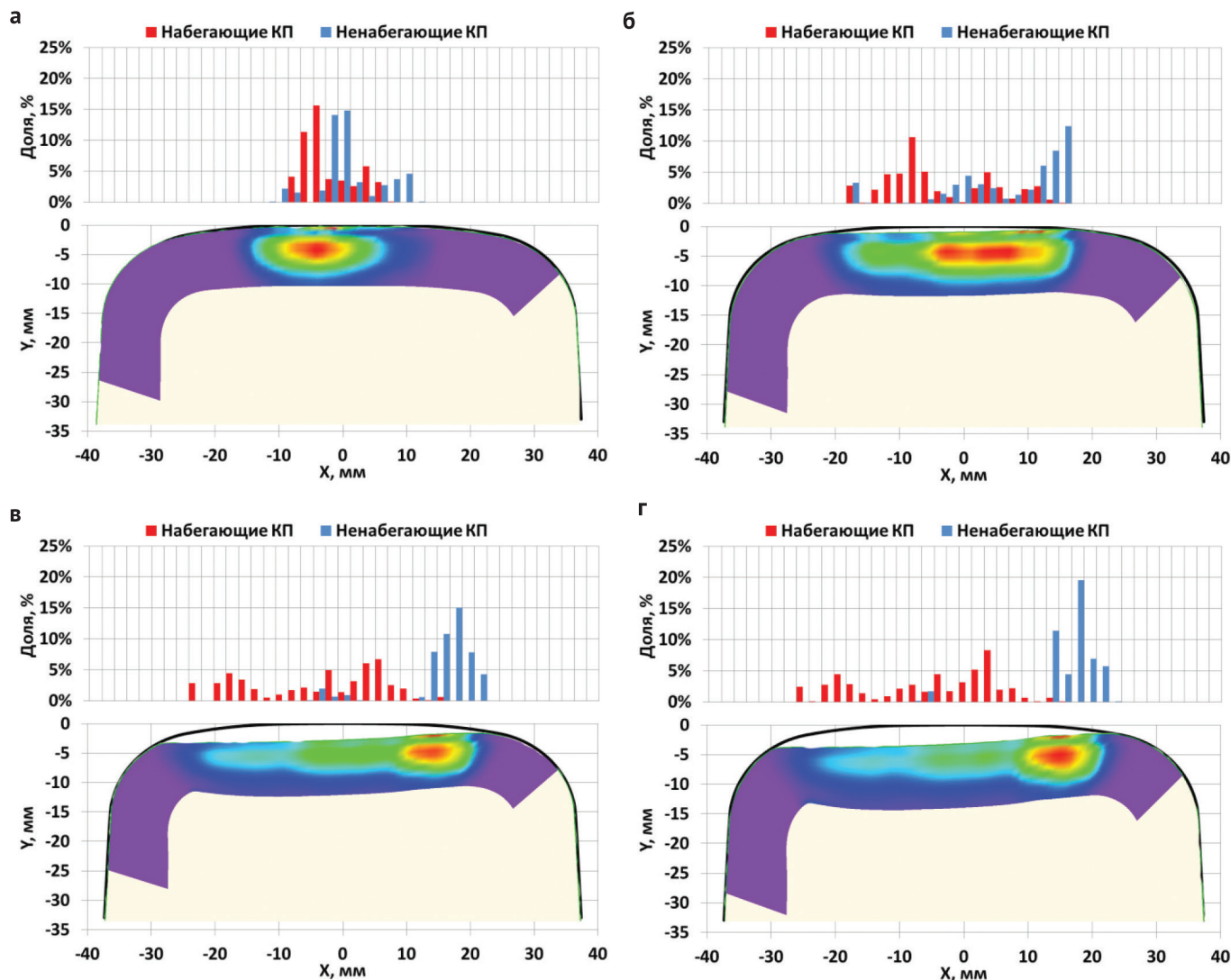


Рис. 1. Распределение точек контакта колес с внутренним рельсом в кривой $R = 300$ м при прокате полувагона с осевой нагрузкой 230 кН при разной эволюции профиля от пропущенного тоннажа: а) 0 млн т брутто; б) 20 млн т; в) 80 млн т; г) 100 млн т брутто

соответствие возвышения рельса радиусу кривой и скорости движения, трибологическое состояние поверхностей трения [1].

Для установления количественных и качественных параметров скорости развития дефектов контактно-усталостного характера на поверхности катания головки рельсов от эксплуатационных факторов проведено моделирование процессов контактно-усталостного повреждения с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» с подключенными модулями UM Subsystems, UM Loco, UM RCF Rail, а также входящий в него программный инструмент Rail Profile Wear Evolution.

Проведено исследование влияния профилей колес и рельсов на скорость развития дефектов контактно-усталостного характера на поверхности катания головки рельсов. На основании результатов расчетов установлено, что колеса с новым профилем по ГОСТ 10791-2011, а также ремонтными профилями,

формируемыми в процессе обточка, определяют повышенное напряженное состояние на поверхности внутреннего рельса при ширине колеи более 1535 мм.

Связано это с переходом зоны контакта исследуемого нового профиля колеса с рельсом к месту сопряжения коничностей 1:10 и 1:3,5 из-за смещения колесной пары к наружному рельсу под наклоном, определяемым возвышением наружного рельса. Учитывая, что зона сопряжения коничностей «закатывается» с увеличением пробега колес грузовых вагонов, рассмотрен вопрос о необходимости учитывать влияние зоны сопряжения на образование контактно-усталостных дефектов (КУД).

Выполнены расчеты скорости нарастания КУД для профилей вагонного колеса по ГОСТ 10791-2011 от пропущенного тоннажа. На основании исследования распределений опытных данных для колес грузовых вагонов по степени износа поверхности катания и гребней

установлено, что 59% колес имеют прокат до 0,5 мм, 23% — 0,5–1,5 мм, 18% — 1,5–2,5 мм. Ширина гребня варьируется от 27 до 33 мм. С учетом этого при моделировании было выбрано 10 профилей колес с различной степенью износа.

Анализ результатов моделирования показал, что по мере износа рельса точки контакта 2-й и 4-й колесных пар (КП) локализуются ближе к наружной грани внутреннего рельса на расстоянии 14–22 мм от оси рельса, а точки контакта колес 1-й и 3-й колесных пар рассредоточены вдоль поперечной поверхности внутреннего рельса в диапазоне –24...+14 мм. Одновременно происходит рост максимальных контактных давлений на внутренний рельс от ненабегающих колес. Распределение точек контакта колеса с рельсом показаны на рис. 1.

При смещении точек контакта от колес КП_{2,4} в узкую зону у нерабочей грани внутреннего рельса возникают неконформные контакты колес и рельсов, в ре-

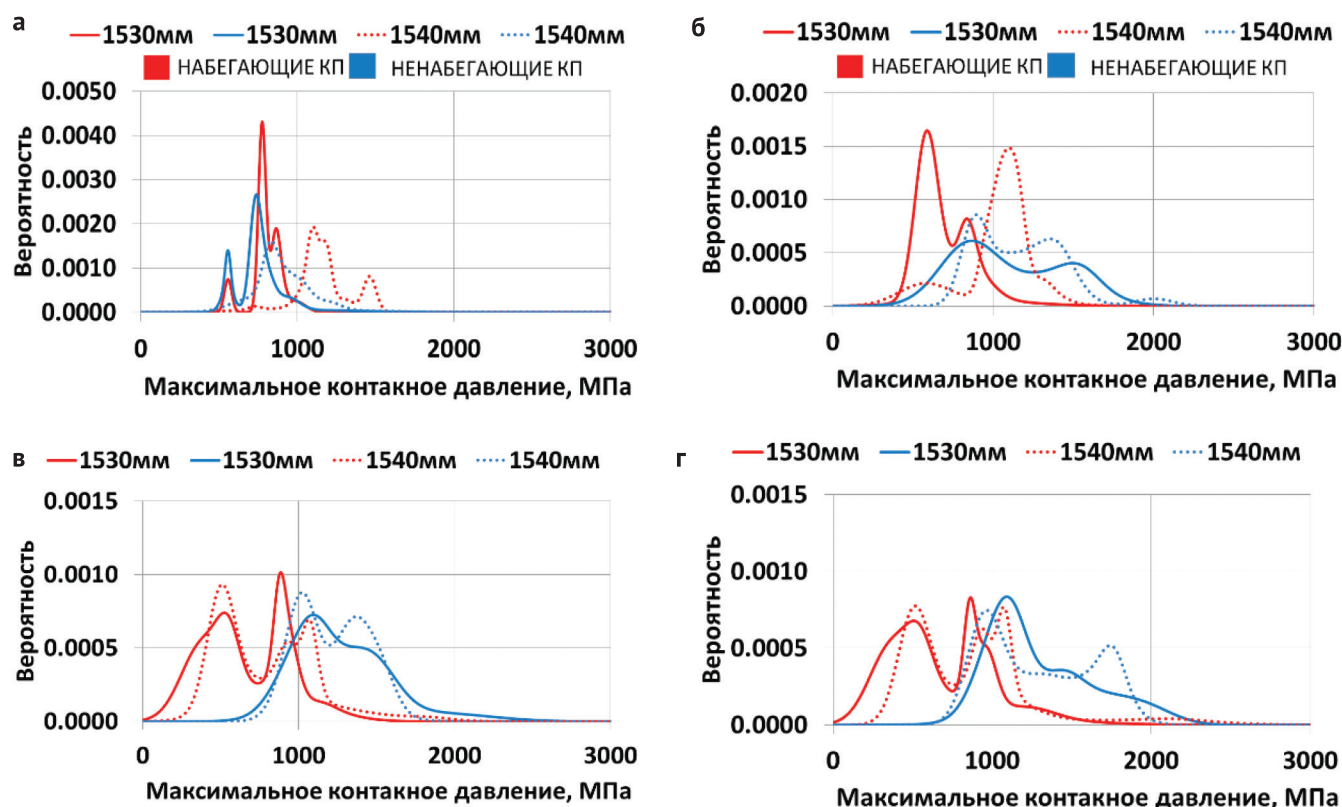


Рис. 2. Сравнительный анализ плотности распределения максимальных контактных давлений в контакте колеса с рельсом для различной ширины колеи и различного пропущенного тоннажа: а) 0 млн т брутто; б) 20 млн т; в) 80 млн т; г) 100 млн т брутто

зультате повышаются уровни контактных давлений и касательных напряжений. Это определяет рост эквивалентных напряжений, превышающих предел контактно-усталостной прочности рельсовой стали, определяющий работу поверхностных слоев рельсовой стали в области прогрессирующей пластической деформации.

Анализ полученных при моделировании данных показал, что для ширины колеи 1540 мм при наработке, близкой к 100 млн т брутто, возникает двухмодальное распределение максимальных контактных давлений от 2-й, 4-й КП в контакте «колесо — рельс» на внутреннем рельсе, частота повышенных контактных давлений возрастает, что способствует более быстрому накоплению повреждаемости

рельса. Сравнительный анализ плотности распределения максимальных контактных давлений в контакте колеса с рельсом для различных ширины колеи и пропущенного тоннажа показан на рис. 2.

Зависимости накопления повреждаемости в опасном сечении рельса от пропущенного тоннажа для профилей вагонных колес по ГОСТ 10791-2011 для разной ширины колеи представлены на рис. 3.

В результате получено, что при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто повреждаемость для ширины колеи 1530 мм на 15 % ниже, чем при ширине колеи 1540 мм.

Как ранее отмечалось, значительное влияние на распределение точек контакта от колес набегающих колесных пар

КП_{1,3} и колес ненабегающих колесных пар КП_{2,4} оказывает эволюция профиля внутреннего рельса в кривых малых радиусов. Для оценки влияния профиля внутреннего рельса на скорость образования КУД проведено моделирование изменения накопления поврежденности от пропущенного тоннажа при использовании на внутренней нити рельса с профилем UIC 60 и P65 по ГОСТ 51685-22.

Анализ результатов моделирования показал, что имеет место незначительное различие в уровнях нормальных давлений и касательных напряжений на первой итерации, в пределах прохождения которой происходит приработка поперечного профиля для рельсов с профилем UIC 60. На участках от -20 мм до +10 мм на поверхности катания рельса от оси симметрии рельса повреждаемость с профилем UIC 60 и P65 по ГОСТ 51685-22 одинакова, что связано с близкими значениями нормальных давлений и касательных напряжений. Сравнительный анализ плотности распределения максимальных контактных давлений в контакте колеса с рельсом представлен на рис. 4.

Результаты расчетов накопления КУД показали, что применение рельса с профилем UIC 60 вместо P65 по ГОСТ 51685-22 является неэффективным по крите-

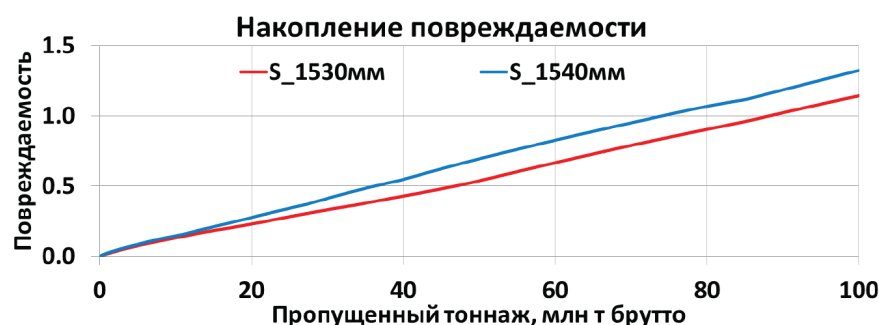


Рис. 3. Зависимости накопления повреждаемости в опасном сечении рельса от пропущенного тоннажа для профилей вагонных колес по ГОСТ 10791-2011 для разной ширины колеи

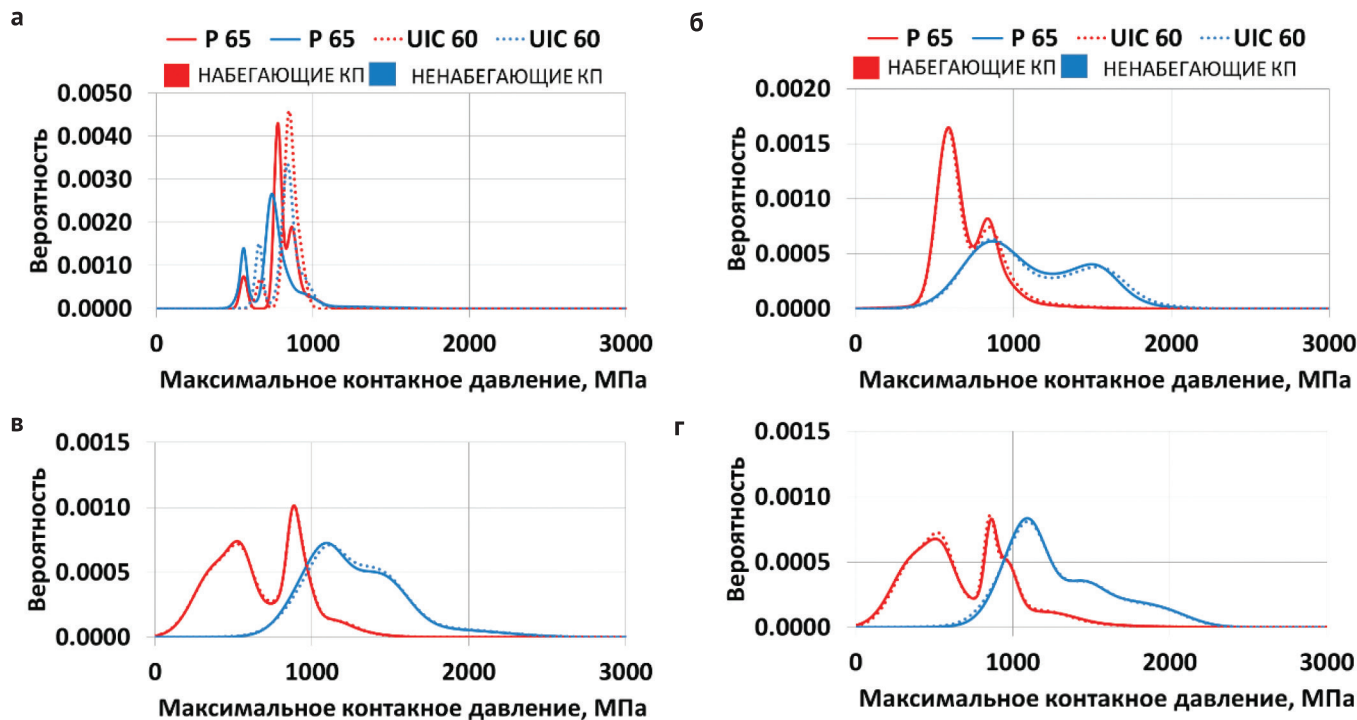


Рис. 4. Сравнительный анализ плотности распределения максимальных контактных давлений в контакте колеса с рельсом при единичном прокате полувагона (для всех профилей колес с учетом доли в расчете) при различном пропущенном тоннаже: а) 0 млн т брутто; б) 20 млн т; в) 80 млн т; г) 100 млн т брутто

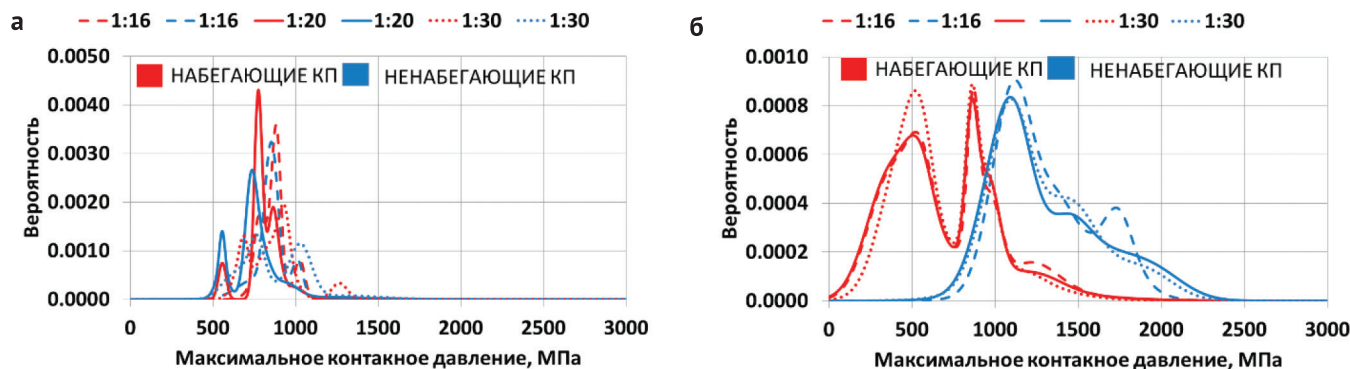


Рис. 5. Плотности распределения максимальных контактных давлений при значениях подуклонки внутреннего рельса 1/16, 1/20 и 1/30: а) на новом рельсе; б) при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто

рию снижения скорости накопления контактно-усталостных дефектов на поверхности катания внутреннего рельса в кривых малого радиуса.

Для определения влияния подуклонки на скорость накопления контактно-усталостных дефектов на поверхности катания внутренних рельсов проведено моделирование с определением распределения точек контакта, контактных давлений, касательных напряжений. Расчеты проводились для номинального значения подуклонки 1/20 и для подуклонки с отклонениями от номинала 1/16 и 1/30. На рис. 5 представлены плотность распределения максимальных контактных давлений на новом рельсе и при пропущенном тоннаже 100 млн т брутто при значениях подуклонки 1/16, 1/20 и 1/30.

Анализ расчетных данных показал,

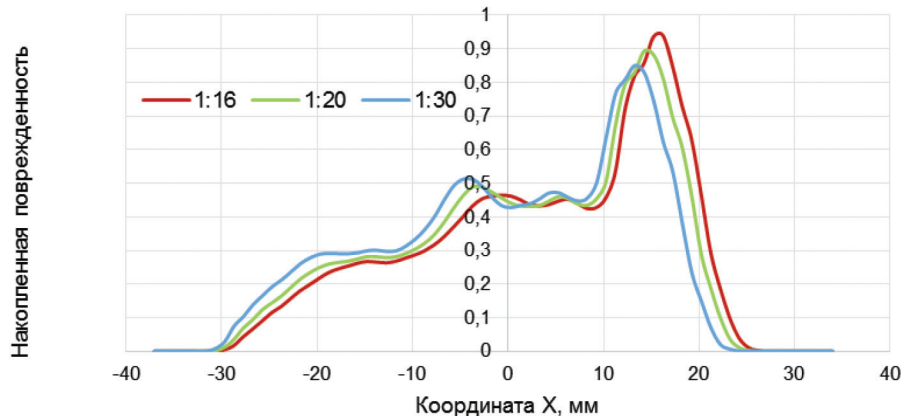


Рис. 6. Эпюры накопленной поврежденности на поверхности катания рельса при значениях подуклонки 1/16, 1/20 и 1/30

что при подуклонке 1/16 наблюдаются повышение контактных давлений и смещение точки накопления КУД в сторону внешней грани внутреннего рельса.

Эпюры накопленной поврежденности на поверхности катания рельса при разных значениях подуклонки 1/16, 1/20 и 1/30 показаны на рис. 6.

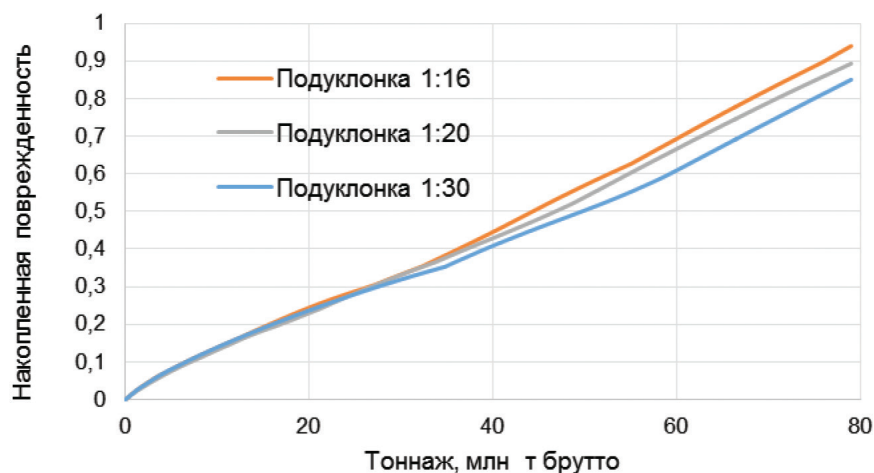


Рис. 7. Зависимости накопления контактно-усталостных дефектов в опасной точке на поверхности катания рельса при разных значениях подуклонки внутреннего рельса

Графики зависимости накопления контактно-усталостной поврежденности в опасной точке рельса представлены на рис. 7.

Снижения напряженного состояния и скорости образования КУД поверхности катания внутреннего рельса можно достичь путем стабилизации подуклонки внутренних рельсовых плетей. Например, путем применения подрельсовых прокладок повышенной жесткости и подшпальных подкладок или же путем применения усовершенствованных типов подкладочных рельсовых скреплений.

Таким образом, выполненные методом компьютерного моделирования исследования эксплуатационных факторов, оказывающих влияние на скорость образования контактно-усталостных дефектов на поверхности катания внутреннего рельса в кривых малых радиусов, позволяют сделать следующие выводы.

Эволюция профиля внутреннего рельса способствует возникновению неконформных контактов колес и рельсов, одновременно происходит смещение точек контакта от колес $KP_{2,4}$ в узкую зону к наружной грани внутреннего рельса, в результате повышаются уровни контактных давлений и касательных напряжений. Это определяет рост эквивалентных напряжений, превышающих предел контактно-усталостной прочности рельсовой стали, определяющий работу поверхностных слоев рельсовой стали в области прогрессирующей пластической деформации, и ведет к появлению контактно-усталостных дефектов на поверхности внутреннего рельса.

В процессе моделирования исследовано влияние на накопление КУД таких факторов, как ширина колеи, подуклонка

рельсов и использование профиля UIC 60 на внутренней нити.

Анализ полученных при моделировании данных показал, что для ширины колеи 1540 мм при наработке, близкой к 100 млн т брутто, возникает двухмодальное распределение максимальных контактных давлений от 2-й, 4-й КП в контакте «колесо — рельс» на внутреннем рельсе, частота повышенных контактных давлений возрастает, что способствует более быстрому накоплению повреждаемости рельса. При пропущенном тоннаже 100 млн т брутто повреждаемость для ширины колеи 1530 мм на 15 % ниже, чем при ширине колеи 1540 мм.

При подуклонке 1/16 наблюдается смещение точки накопления КУД в сторону внешней грани внутреннего рельса и повышение контактных давлений, что способствует наиболее быстрому накоплению КУД на поверхности рельса.

Применение рельса с профилем UIC 60 вместо P65 по ГОСТ 51685-22 не существенно влияет на возникающие в зоне контакта «колесо — рельс» нормальные давления и касательные напряжения и является неэффективным методом снижения скорости накопления контактно-усталостных дефектов на поверхности катания внутреннего рельса в кривых малого радиуса.

Источники

- Захаров С. М., Торская Е. В. Подходы к моделированию возникновения поверхностных контактно-усталостных повреждений в рельсах // Вестн. ВНИИЖТ. 2018. Т. 177, № 4. С. 259–268.
- Цвигун В. Н. и др. Изучение механизмов контактно-усталостных дефектов рельсов. Новокузнецк: Центр СибГНУ, 2017. 133 с.

- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо — рельс / пер. с англ.; под ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2017. 420 с.
- Богданов В. М. и др. Моделирование процессов контактирования, изнашивания и накопления повреждений в сопряжении «колесо — рельс» // Трение и износ. 1996. Т. 17, № 1. С. 12–27.
- Сакало В. И., Сакало А. В. Выбор критерия для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в колесах железнодорожного подвижного состава // IV науч.-техн. семинар «Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ», Брянск, 3–4 апр. 2018 г. Брянск, 2018. С. 63–70.
- Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
- Горячева И. Г., Торская Е. В. Моделирование условий образования контактно-усталостных повреждений поверхности катания // Контактные-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / под. ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2004. С. 58–97.
- Goryacheva I. G., Zakharov S. M., Torskaya E. V. Rolling contact fatigue and wear of wheel/rail simulation // Proc. Second Int. conf. railway technology research development and maintenance. Paper 0123456789. Stirlingshire: CivilComp Press, 2014. 15 p.
- Burstow M. A whole life rail model application and development for RSSB — continued development of an RCF damage parameter // Rail Standard and Safety Board. London, UK. 2004.
- Chung Lun Pun, Welsby D., Mutton P., Yan W. Rolling contact fatigue life prediction for rails and welds in heavy haul systems // Proc. Int. Heavy Haul Conf. IHHA-2015, Perth, Australia, 2015. Perth, 2015.
- Коган А. Я., Абдурашитов А. Ю. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения // Вестн. ВНИИЖТ. 2014. № 4. С. 3–7.
- Trummer G., Marte C., Dietmaier P. et al. Modeling surface rolling contact fatigue crack initiation taking severe plastic shear deformation into account // Wear. 2016. Vol. 352–353. P. 136–145.
- Trummer G., Six K., Woelfle A. et al. Comparison of rolling contact fatigue crack initiation models under heavy haul conditions // Proc. Int. Heavy Haul Conf. IHHA-2017, Cape Town, SA, 2017. Cape Town, 2017. P. 79–84.