

ДЫМОЧКИН Денис Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы».
SPIN-код: 8580-4935
AuthorID (РИНЦ): 765380
Адрес для переписки: dydedmi_77_06_02@mail.ru

тической системы горизонтирования крутосклонной мобильной машины с гидравлическим датчиком крена // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 11–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-11-18.

Для цитирования

Грищенко В. И., Тумаков А. А., Полешкин М. С., Килина М. С., Дымочкин Д. Д. Моделирование автома-

Статья поступила в редакцию 21.01.2019 г.

© В. И. Грищенко, А. А. Тумаков, М. С. Полешкин, М. С. Килина, Д. Д. Дымочкин

УДК 621.9.015:629.014.7
DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-18-22

**М. И. БИСЕРИКАН
С. В. ПЕТРОЧЕНКО
К. В. АВЕРКОВ**

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАГОННОГО КОЛЕСА ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РЕЛЬСОМ

Выполнен анализ процессов, протекающих при взаимодействии колеса с рельсом. Проведены исследования процессов, протекающих при взаимодействии колеса с рельсом по методу подобия. Визуально контролировано возникновение контактно-усталостных поверхностных дефектов. Сделан вывод о связи максимальной высоты волнистости на поверхности ролика и скорости повреждения его поверхности. Построена зависимость, позволяющая определить число циклов воздействия приложенной к поверхности ролика нагрузки, в зависимости от макрогеометрических параметров его поверхности. Сделаны выводы об ускорении развития контактно-усталостных дефектов при увеличении макрогеометрических отклонений.

Ключевые слова: контактно-усталостные явления, износ, усталостный дефект, колесо повышенной твердости, взаимодействие колеса и рельса, механическая обработка.

Движение колеса грузового вагона по рельсу характеризуется значительными динамическими нагрузками, изменяющимися в широких пределах. В связи с этим возрастают механические напряжения в ободке колеса, что вызывает ускорение процесса накопления усталостных повреждений и скорости абразивного изнашивания трущихся поверхностей. Для уменьшения данного эффекта был изменен химический состав стали, применяемой для производства колес грузовых вагонов, за счет увеличения значения временного сопротивления до $\sigma_b = 1020 - 1180$ МПа и твердости до $HV = 3200 - 3600$ МПа, при сохранении значения ударной вязкости $KCU = 16$ Дж/см² [1]. В результате

данного мероприятия уменьшилось число отцепок грузовых вагонов на неплановые ремонты в результате износа по таким дефектам как прокат поверхности катания на 30–35 % и подрез гребня на 45–54 %. Вместе с тем было отмечено увеличение числа отцепок по термомеханическим повреждениям — ползунам на поверхности катания и усталостным повреждениям — выщербинам [2]. Наличие выщербин на поверхности катания колеса является фактором, напрямую влияющим на эксплуатационный ресурс колес. Колесные пары с подобными дефектами изымаются из эксплуатации и подвергаются восстановлению профиля поверхности катания за счет лезвийной обработки на специализированном

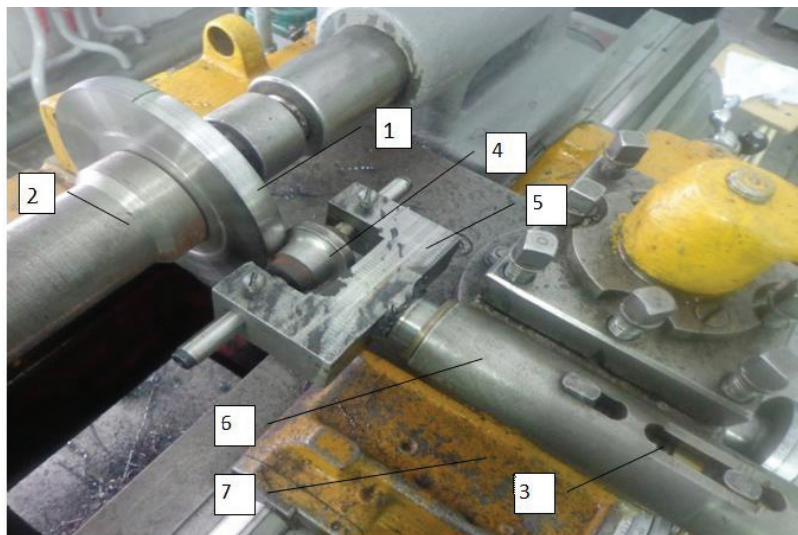


Рис. 1. Установка для испытания пары колесо–рельс на контактную усталость: 1 — ролик, имитирующий рельс; 2 — оправка; 3 — пружина; 4 — ролик, имитирующий колесо; 5 — вилка; 6 — приспособление; 7 — суппорт

оборудовании [3]. В результате точения в стружку снимается значительной толщины слой металла (в некоторых случаях до 10–15 мм) [4], а восстановленная поверхность подвержена явлению технологической наследственности [5]. К данному явлению не предъявляются особые требования, регламентировано наибольшее значение разницы диаметров колеса, измеряемых в трех положениях. Таким образом, на поверхности катания восстановленного колеса находятся участки — концентраторы механических напряжений. Исследованиями [6] определено значительное увеличение значения возникающих напряжений при некоторых условиях в 1,8–2 раза. Материал колеса работает в условиях всестороннего сжатия и столь высоких значениях напряжений значительно ускоряются процессы изнашивания, и, соответственно, необходимо определение параметров макрогеометрических отклонений профиля поверхности и ограничение их величины [7].

Также ввиду недостаточно эффективной технологии ремонта создаются благоприятные условия для образования усталостных трещин. Однако накопление повреждений в поверхностном слое требует определенного времени, которое зависит от условий эксплуатации, на которые также влияет постоянное уменьшение радиуса колеса за счет процесса износа и частичное удаление слоя с возможными дефектами на поверхности катания колеса.

Для исследования процессов, протекающих при взаимодействии колеса с рельсом, использовалась методика, представленная в [8], основанная на взаимодействии двух роликов, моделирующих взаимодействие пары трения колесо–рельс (рис. 1).

Ролик 1, имитирующий рельс, выполненный в виде диска, устанавливается в оправку 2 шпинделя станка. На суппорте станка 7 крепится приспособление 6 с расположенной внутри пружиной 3 и установленной вилкой 5, в центрах

которой размещается ролик 4, имитирующий колесо. Для устойчивого контакта имитатор колеса подводится к имитатору рельса при помощи поперечной подачи. Скорость вращения имитаторов регулируется при помощи коробки скоростей станка. Силовое взаимодействие данных роликов обеспечивается тарированной пружиной.

Ролики для имитации колес изготавливались из заготовок, вырезанных из материала цельнокатаного колеса на расстоянии 5–10 мм от поверхности катания. Термическая обработка проводилась для достижения среднего значения твердости цельнокатаного колеса $HV = 3400$ МПа, согласно [1]. В качестве имитатора рельса использовался диск, изготовленный из стали Р65, закаленный при температуре $T = 850$ °С, выдержанный по времени $t = 20$ минут и охлажденный в масле марки И40 для обеспечения необходимой твердости. Твердость образца составила $HV = 4010$ МПа, что соответствует регламентированной твердости рельсов, применяемых в настоящее время [9]. Термическая обработка имитаторов проводилась в электрической камерной печи 1,6,2,5.1/11-И1М НПФ ТерМИКС. Контроль значения твердости осуществлялся твердомером ТШ-2М по методу Бринелля.

Размеры колеса и рельса на роликах, согласно методу подобию, уменьшены в двадцать раз. В эксперименте принята шероховатость, соответствующая стадии приработки колеса и рельса $R_a = 1,25$ мкм. Линейная скорость имитатора колеса соответствует линейной скорости вращения колесной пары в рабочих режимах хода поезда, с учетом перспективы повышения ее до 160 км/ч (табл. 1). На ролик, имитирующий колесо, прикладывалась статическая нагрузка $P_0 = 890$ Н (89 кг).

Так как в лабораторных условиях затруднительно реализовать нагрузки, действующие на колесо в процессе эксплуатации, они были уменьшены с учетом поправочного коэффициента (табл. 2).

Таблица 1

Соотношение частоты вращения и линейной скорости подвижного состава

| $n_{см'}$ об/мин | $n_{обр'}$ об/мин | $K_{нопр}$ | $V_{п'}$ км/час |
|------------------|-------------------|------------|-----------------|
| 80 | 400 | 0,91 | 80 |
| 125 | 625 | | 120 |
| 160 | 800 | | 160 |

Таблица 2

Соотношение нагрузки на колесо и усилия на образец

| Нагрузка | $P_{к'}$ тс | $P_{к'}$ Н | $\sigma_{\max к'}$ МПа | $K_{нопр}$ | $P_{обр'}$ Н | $\sigma_{\max обр'}$ МПа |
|----------|-------------|------------|------------------------|------------|--------------|--------------------------|
| P_0 | 13680 | 136800 | 1425 | 153,2 | 890 | 1420 |
| P_1 | 17512 | 175100 | 1710 | | 1150 | 1700 |
| P_2 | 14360 | 143600 | 1650 | | 940 | 1635 |
| P_3 | 16840 | 168400 | 1700 | | 1100 | 1690 |

Усталостный дефект

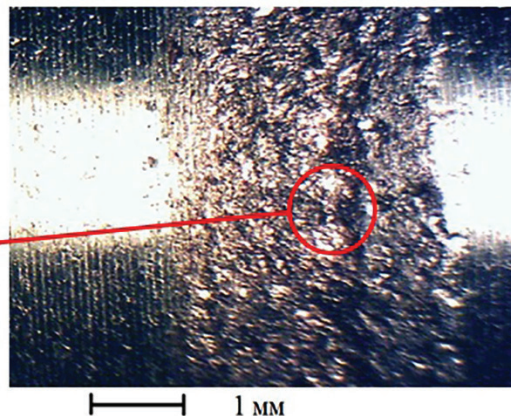


Рис. 2. Усталостное разрушение поверхности роликов

В результате механической обработки на поверхности образцов, имитирующих колесо, была сформирована волнистость, в результате чего нагружение поверхности ролика происходило неравномерно. Высота волнистости образцов была подобрана таким образом, чтобы напряжения, возникающие при контакте между имитаторами, соответствовали напряжениям, возникающим при взаимодействии колеса и рельса. Образцы были разделены на 4 группы, соответствующие максимальной высоте волнистости их поверхности от 0,02 до 0,05 мм. На образцах были выделены области, соответствующие максимальным высотам волнистости. Значения максимальных напряжений в пятне контакта (табл. 2) получены исходя из методики [8].

Неравномерное нагружение поверхности катания образцов создавало благоприятные условия для зарождения поверхностных дефектов, концентраторами напряжений являются вершины волнистости. Так как данный процесс требует

определенного числа циклов нагружения, производилась периодическая оценка состояния поверхности образцов на наличие контактно-усталостных дефектов, через заданные промежутки времени, осуществлялся визуальный осмотр без увеличения (рис. 2) и с увеличением в 10 и 25 крат соответственно (рис. 3а, б). Число циклов взаимодействия контактирующих тел соответствует числу оборотов вагонного колеса, проходящее расстояние 20 тыс. км. Опыты повторялись до достижения числа нагружений, соответствующих 300 тыс. км пути проходимым вагоном.

По результатам измерений сделан вывод о связи между максимальной высотой волнистости на поверхности ролика и скорости повреждения его поверхности. При этом подтвердилось предположение о связи неровностей с контактно-усталостными повреждениями, ставшие центрами зарождения дефектов. По результатам эксперимента была построена зависимость

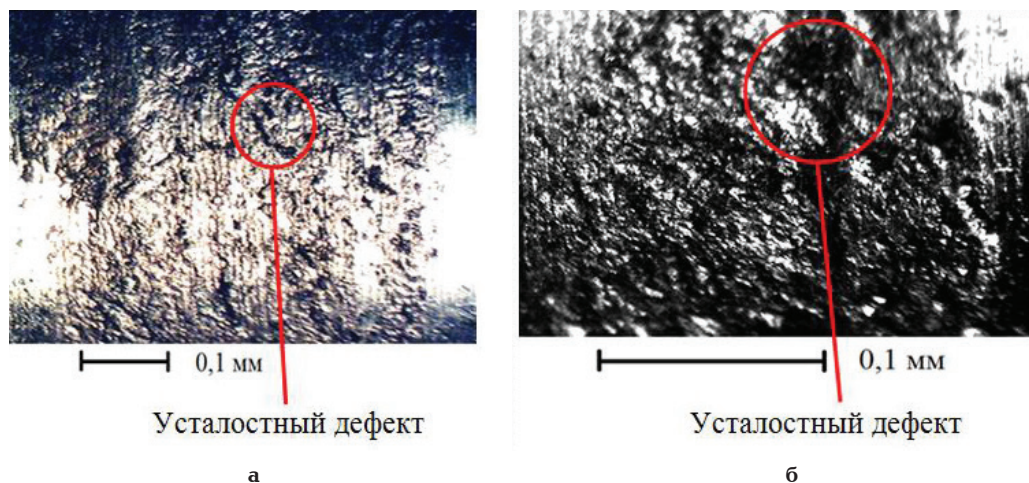


Рис. 3. Область усталостного разрушения поверхности роликов:
а — увеличение 10 крат; б — увеличение 25 крат

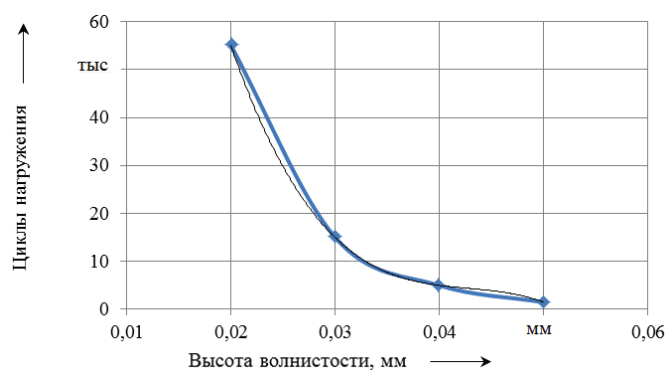


Рис. 4. Зависимость числа циклов нагружения ролика от высоты волнистости

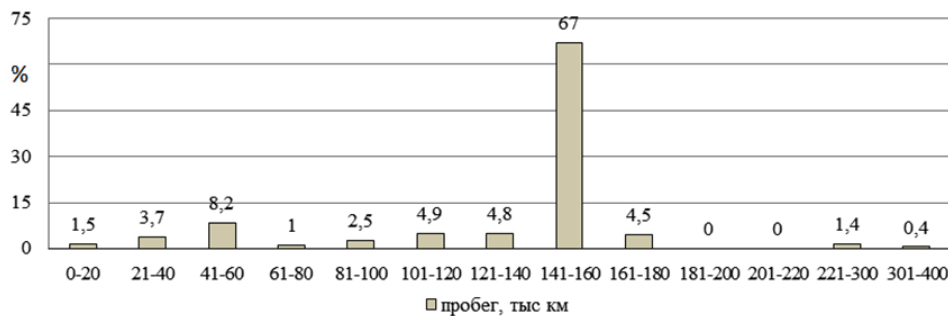


Рис. 5. Зависимость повреждаемости поверхности катания колеса от пробега колесной пары

числа циклов нагружения роликов от высоты волнистости (рис. 4). Высота волнистости образца изменялась от 0,02 до 0,05 мм, что с учетом коэффициента подобия соответствует высоте макронеровности 0,15–0,6 мм на поверхности вагонного колеса.

Из проведенных исследований следует, что первые признаки усталостных повреждений поверхности катания роликов наблюдались уже после 21 тыс. циклов нагружений, что соответствует пробегу колеса 62 тыс. км, при этом увеличение высоты волнистости привело

к значительному сокращению данного показателя. Построенный график, представленный на (рис. 4), позволяет определить число циклов воздействия приложенной к поверхности ролика нагрузки в зависимости от макрогеометрических параметров его поверхности.

Полученная зависимость описывается полиномиальной функцией 3-й степени:

$$N = -1,37 \cdot 10^9 \cdot x^3 + 2 \cdot 10^8 \cdot x^2 - 9,7 \cdot 10^6 \cdot x + 1,6 \cdot 10^5. \quad (1)$$

Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$.

По информации из автоматизированной базы данных ОАО «РЖД» [10] построен график распределения пробега колес повышенной твердости между обточками (рис. 5). Анализ данной диаграммы позволяет сделать вывод о том, что порядка 27 % парка колесных пар имеют пробег значительно меньший регламентированного правилами ремонта значения, из них примерно половина (13,4 % колес) требует восстановления поверхности катания при пробеге менее 60 тыс. км. Основная группа колес имеет пробег до обточки от 141 до 160 тыс. км, и только у 6,3 % пробег между переточками превышает 160 тыс. км. При повышении высоты макронеровности область, в которой работает колесо (рис. 4), смещается влево и вверх — с преобладающими контактно-усталостными повреждениями. Таким образом, данные, полученные в результате экспериментального исследования и математического моделирования, согласуются с данными повреждений и пробега колесных пар в эксплуатации.

Выполненное экспериментальное исследование усталостной долговечности вагонного колеса показало, что макрогеометрические отклонения ускоряют развитие контактно-усталостных дефектов. Увеличение высоты волнистости с 0,02 до 0,05 мм уменьшает в 3,6 раза число циклов нагружения образца, имитирующего вагонное колесо, до появления усталостных трещин. Исходя из полученных результатов, можно предложить рекомендации по увеличению числа циклов нагружения поверхности катания вагонных колес и, соответственно, их межремонтных пробегов за счет уменьшения высоты волнистости профиля при их обточке в условиях ремонтных предприятий.

Библиографический список

1. ГОСТ 10791—2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. Введ. 2012—01—01. М.: Стандартинформ, 2011. 33 с.
2. Обрывалин А. В. Восстановление профиля катания вагонных колес повышенной твердости с эксплуатационными дефектами термомеханического происхождения // Известия Транссиба. 2012. № 4 (12). С. 30—34.
3. Рекомендации по использованию и назначению параметров режима механической обработки при восстановлении профиля поверхности катания вагонных колес. М.: ЦВ МПС, 1994. 26 с.
4. Иванов И. А., Кушнер В. С., Воробьев А. А. Определение режимов обработки обода железнодорожных колес повышенной твердости на основе термомеханического

подхода // Вестник транспорта Поволжья. 2009. № 1 (17). С. 34—40.

5. Лебедев В. Я. Технологическая наследственность и качество в машиностроении // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. 2015. Вип. 15. С. 47—58.
6. Бисерикан М. И., Обрывалин А. В., Рауба А. А. Влияние технологической наследственности на контактное напряжение в системе «колесо—рельс» // Омский научный вестник. 2011. № 1 (97). С. 68—72.
7. Ражковский А. А., Бунькова Т. Г., Петракова А. Г. [и др.]. Оптимизация соотношения твердости пары трения «колесо—рельс» // Трение и износ. 2015. Т. 36, № 4. С. 433—442.
8. Бисерикан М. И. Обеспечение работоспособности колес грузовых вагонов, эксплуатируемых в условиях повышенных динамических нагрузок: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2013. 158 с.
9. Гапанович В. А., Сосновский Л. А. Какой должна быть поверхностная твердость рельсов // Железнодорожный транспорт. 2009. № 12. С. 36—40.
10. Справочные материалы по поступлению колесных пар грузовых вагонов в ВКМ и КРЦ вагоноремонтных и эксплуатационных депо России за 2011 год. М.: ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2012. 47 с.

БИСЕРИКАН Михаил Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

SPIN-код: 6099-5070

ORCID: 0000-0001-8862-515X

Адрес для переписки: radenxg@mail.ru

ПЕТРОЧЕНКО Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

SPIN-код: 3294-1488

ORCID: 0000-0001-5600-835X

Адрес для переписки: c.o.r.d.8477@gmail.com

АВЕРКОВ Константин Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

SPIN-код: 8407-0488

Для цитирования

Бисерикан М. И., Петроченко С. В., Аверков К. В. Экспериментальное исследование усталостной долговечности вагонного колеса повышенной твердости при взаимодействии с рельсом // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 18—22. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-18-22.

Статья поступила в редакцию 19.03.2019 г.

© М. И. Бисерикан, С. В. Петроченко, К. В. Аверков