

тем самым вероятность образования задиров. Показана хорошая сходимости результатов теоретических расчетов, выполненных на основании построенной модели, и экспериментальных данных в области определения толщины образующейся защитной пленки вторичных структур.

Литература

1. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. — М.: Наука, 2001. — 478 с.
2. Буше Н. А., Гуляев А. С., Двоскина В. А., Раков К. М. Подшипники из алюминиевых сплавов. — М.: Транспорт, 1974. — 225 с.
3. Буше Н. А., Горячева И. Г., Корнеев Р. А. / Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Спецвыпуск. 2001. С. 35 – 39.
4. Bushe N. A., Goryacheva I. G., Makhovskaya Yu. Yu. / WEAR. 2003. V. 254. P. 1276 – 1280.
5. Буше Н. А., Горячева И. Г., Маховская Ю. Ю. / Трение и износ. 2002. № 4. С. 286 – 295.
6. Курбаткин И. И., Буше Н. А., Горячева И. Г., Зайчиков А. В. / Трение и износ. 2006. Т. 27. № 4. С. 355 – 360.
7. Carslow H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. — Oxford University Press, 1959.
8. Ling F. F. Surface mechanics. — New York: John Wiley, 1973.
9. Коровинский М. В. — В кн.: Теория трения и износа. — М.: Наука, 1965. С. 73 – 80.

УДК 620.178.16:625.03

ОРИГИНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗНОСОУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ КОЛЕСО/РЕЛЬС НА МАЛОРАЗМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ

© Н. А. Махутов¹, В. О. Замятнин², С. А. Тюрин³, С. С. Щербаков⁴

Статья поступила 26 апреля 2006 г.

Описаны новые методы износоусталостных испытаний различных моделей системы колесо/рельс. В качестве элемента, моделирующего рельс, предложено кольцо. Картина повреждаемости, выявленная на испытанном образце-рельсе, аналогична полученной при эксплуатации рельсов. Метод испытаний прошел апробацию.

В рамках трибофатики разработан и получил широкое применение метод комплексных износоусталостных испытаний на контактно-механическую усталость [1 – 6]. Данный метод испытаний реализуется следующим образом (рис. 1). Цилиндрический образец 1 одним концом закрепляется в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . К другому его концу прикладывается вертикальная изгибающая (внеконтактная) нагрузка Q , направленная вверх или вниз. К рабочей зоне образца, которая имеет диам. $d = 10$ мм, прижимается под действием контактной нагрузки F_N контрообразец — ролик 3, который вращается с частотой ω_2 . Причем допустимы варианты $\omega_2 \geq \omega_1$ и $\omega_2 \leq \omega_1$, что обеспечивает бесступенчатое регулирование степени проскальзывания. Таким образом, рабочая зона образца 1 может имитировать рельс, а ролик 3 — колесо, при этом контактную и изгибающую нагрузки задают раздельно, обеспечивая необходимое отношение между ними (F_N/Q).

Однако данный метод испытаний неприемлем, например, для оценки остаточного ресурса рельсов после пропуска некоторого тоннажа. Это связано с тем, что при вырезке образца из натурального отрезка рельса неизбежно снимается его рабочий поверхностный слой, поэтому изменение свойств материала в зоне дорожки качения не может быть оценено. Имеются и на другие недостатки способа испытаний модели системы колесо/рельс (см. рис. 1). Так, модель рельса, как и модель колеса, оказывается жесткой, тогда как в действительности рельс лежит на упругом основании и имеет, следовательно, различную жесткость, например над шпалой и в междушпальном пространстве. Наконец, моделирование системы колесо/рельс могло бы быть более корректным, если контактные и изгибные напряжения удалось бы возбуждать при действии единой нагрузки, как в процессе эксплуатации. В литературе по железнодорожному транспорту эту нагрузку называют «осевой», потому что она передается от вагона вдоль вертикальной оси симметрии каждого из колес. Будем называть ее контактной и обозначать F_N , как на рис. 1.

Таким образом, требуется разработать принципиально новую модель для испытаний системы колесо/рельс. Сформулируем основные требования к построению такой модели:

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

² РУП Гомельский завод сельскохозяйственного машиностроения «Гомсельмаш», г. Гомель, Беларусь.

³ Институт механики и надежности машин НАНБ, г. Минск, Беларусь.

⁴ Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь.

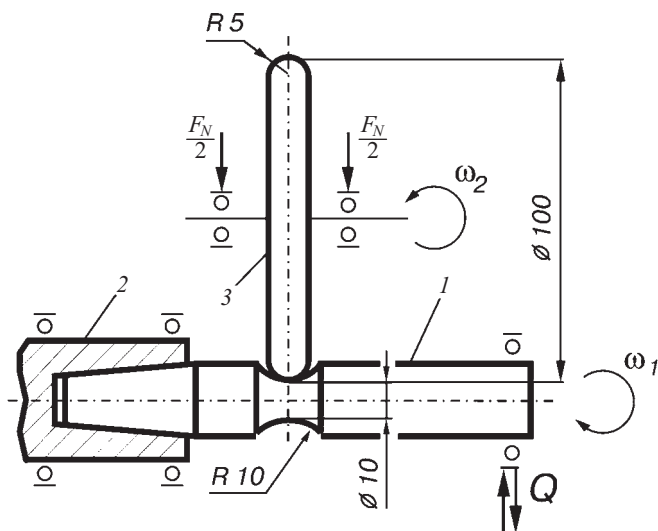


Рис. 1. Схема испытаний на контактно-механическую усталость: 1 — образец; 2 — шпindelь; 3 — контрообразец-ролик

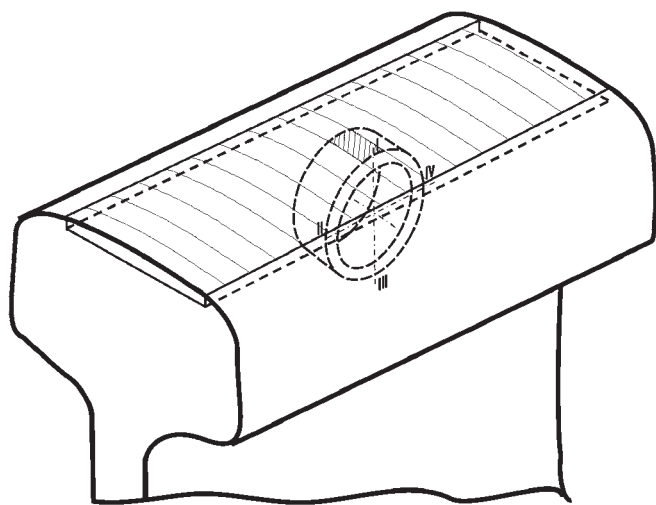


Рис. 2. Схема вырезки образца, моделирующего рельс, с сохранением рабочего поверхностного слоя

1) изгибающие и контактные напряжения должны быть вызваны одной нагрузкой;

2) опасные (наибольшие) контактные и изгибные напряжения должны обнаруживаться в единой области конечных размеров — в окрестности площадки контакта;

3) в общем случае площадка контакта — эллиптическая; по мере деформации и износа в процессе испытаний она может трансформироваться почти в полосу;

4) элементу, моделирующему рельс, следует иметь варьируемую жесткость (по направлению действия силы F_N);

5) условия испытаний должны привести к комплексному износоусталостному повреждению модели, основными проявлениями которого являются —

различные виды поверхностного контактно-усталостного повреждения (износ, остаточная деформация, продольные микротрещины, ямки выкрашивания и т.п.);

объемное разрушение путем развития поперечной магистральной усталостной трещины.

Нетрудно видеть, что эти требования вполне соответствуют условиям работы и повреждениям натурной системы колесо/рельс в процессе эксплуатации.

Моделирование колеса в соответствии с сформулированными выше требованиями не вызывает особых затруднений: это может быть ролик с одним либо двумя радиусами кривизны. Примем, что и рельс конструктивно представляет собой ролик с одним либо двумя радиусами кривизны. Ролик можно вырезать из головки рельса так, что одна из его периферийных рабочих зон оказывается расположенной на дорожке качения рельса (рис. 2, зона I). В вырезанном таким образом ролике при последовательном переходе от зоны I к зонам II либо IV испытываться будут соответствующие слои под поверхностью рельса, т.е. под

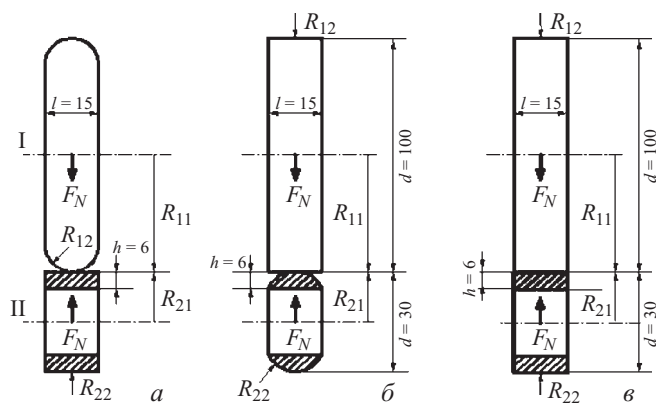


Рис. 3. Варианты моделей системы колесо I/рельс II, при которых в зоне взаимодействия реализуется эллиптический контакт (a – в)

дорожкой качения на любой глубине. Более того, в зонах II – III и III – IV материал рельса будет практически неповрежденным. Таким образом, обеспечивается возможность сравнения свойств материала до и после эксплуатации рельса при испытании одного образца-модели.

Пусть элемент, моделирующий рельс, является не роликом, но кольцом. Это условие позволяет в конечном счете предложить общую принципиальную схему модели колесо/рельс (рис. 3, a – в), удовлетворяющую основным требованиям к ней, изложенным выше.

На рис. 3, a и б показаны по существу равноценные модели, которые реализуются практически одинаково, и выбор той или иной из них диктуется соображениями удобства. Для обоих элементов модели указаны конкретные значения диаметров. Диаметр рельса-кольца ($d = 30$ мм) определяется толщиной головки рельса Р50 по высоте (см. рис. 2). Диаметр колеса-ролика ($d = 100$ мм) принят таким, чтобы обеспечить возможность испытания модели на имеющихся ма-

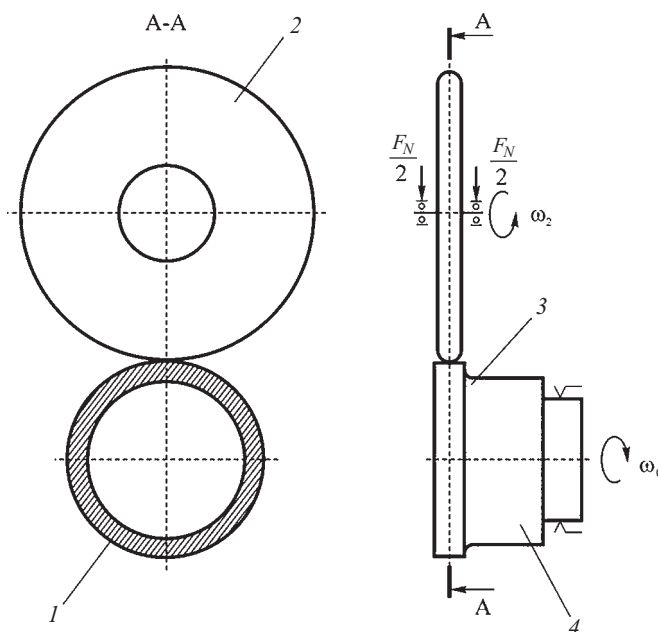


Рис. 4. Конструктивная схема модели системы колесо/рельс: 1 — образец; 2 — контрообразец; 3 — консоль; 4 — основание

шинах серии СИ [7]. Выбор размеров h и l , а также различных радиусов R — задача непринципиальная. Она решается из конструктивных соображений, а также исходя из величины наибольшей нагрузки, которую можно задавать на испытательных машинах серии СИ.

В случае большого износа рельса правомерно использовать модель, показанную на рис. 3, в. Ее конструктивная схема представлена на рис. 4.

Таким образом, при предложенном способе испытаний контактная нагрузка, прижимающая контрообразец к образцу, одновременно возбуждает в зоне взаимодействия как контактные, так и изгибные напряжения, что приближает условия испытаний к условиям эксплуатации системы колесо/рельс. А вырезка образца в виде кольца из натурального рельса позволяет не снимать его рабочий поверхностный слой.

Описанный способ моделирования системы колесо/рельс может быть усовершенствован. На внутренней поверхности кольца, моделирующего рельс, можно изготовить дискретно расположенные выступающие элементы, имитирующие шпалы, количество которых варьируется (рис. 5). Изменение количества дискретно расположенных на внутренней поверхности кольца выступающих элементов приводит к изменению соотношения изгибных и контактных напряжений в соответствующих зонах. При вращении кольца происходит поочередный переход от надшпальной области (максимальная жесткость) к середине пролета (минимальная жесткость); таким образом имитируется изменение жесткости в системе рельс/основание. Кроме того, в кольце могут быть прорезаны пазы, имитирующие стыки рельсов, имеющиеся в реальных условиях эксплуатации (см. рис. 5, в).

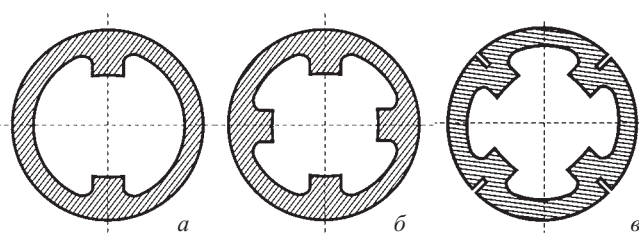


Рис. 5. Варианты исполнения образца с выступающими элементами, имитирующими шпалы

На рис. 6 показана еще одна модель системы колесо/рельс, которая позволяет более полно воспроизвести реальное напряженное состояние ее элементов. Образец 1, выполненный в виде кольца с радиусами кривизны в двух взаимно перпендикулярных направлениях, моделирует рельс, а контрообразец 2, представляющий собой усеченный конус 3 с ребордой 4 у большего основания, — колесо. Взаимодействие колеса и рельса осуществляется в зонах качения и скольжения, как в реальных условиях.

Контактная нагрузка F_N одновременно возбуждает на дорожке качения изгибные и контактные напряжения, а осевая нагрузка F_x в зоне трения скольжения реборды колеса по боковой поверхности рельса — фрикционные и изгибные напряжения. При этом зона контактного взаимодействия 5 отстоит от вертикальной оси симметрии рельса (плоскости действия силы F_N) на расстоянии эксцентриситета e , что позволяет, изменяя угол α между образующей и высотой конусной поверхности колеса, варьировать соотношение изгибных и контактных напряжений в рельсе.

Описанные новые схемы испытания различных моделей системы колесо/рельс в настоящее время патентуются, экспериментально отрабатываются соответствующие методики испытаний, устанавливаются рациональные сферы их использования.

Апробацию разработанного метода испытаний системы колесо/рельс проводили на испытательной машине СИ-03М [7]. Образцы вырезали из головки рельса Р50 (ГОСТ 16210–77) до эксплуатации и испытывали по схеме, показанной на рис. 3, а.

Испытания проводили в заведомо “тяжелых” условиях: частота нагружения составляла 3000 мин^{-1} , степень проскальзывания образца и контрообразца — 50%. При испытаниях реализованы две ступени нагружения контактной нагрузкой F_N — 40 и 130 Н (рис. 7, а). Длительность испытаний на первой ступени — 10^6 , а на второй — $3,9 \cdot 10^5$ циклов (определяется достижением предельного состояния).

В процессе испытаний измеряли следующие параметры: частоту вращения образца (мин^{-1}); контактную нагрузку F_N (Н) и сближение осей образца и контрообразца δ_c (мкм).

Развитие процессов повреждаемости, иллюстрируемое временным графиком изменения сближения осей δ_c (см. рис. 7, б), является обычным, без каких-либо отклонений от установленных закономерно-

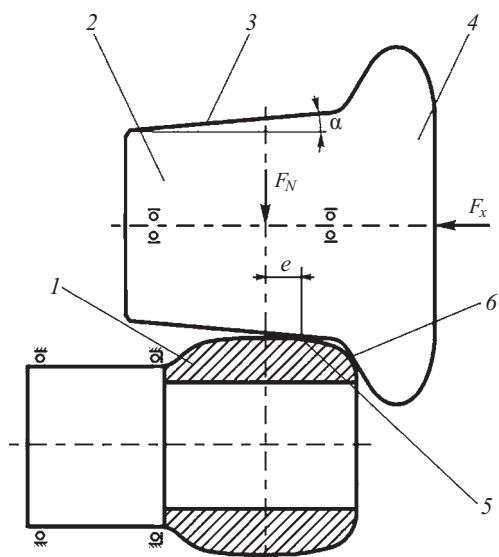


Рис. 6. Схема модели системы колесо/рельс, где образец — кольцо с ребордой

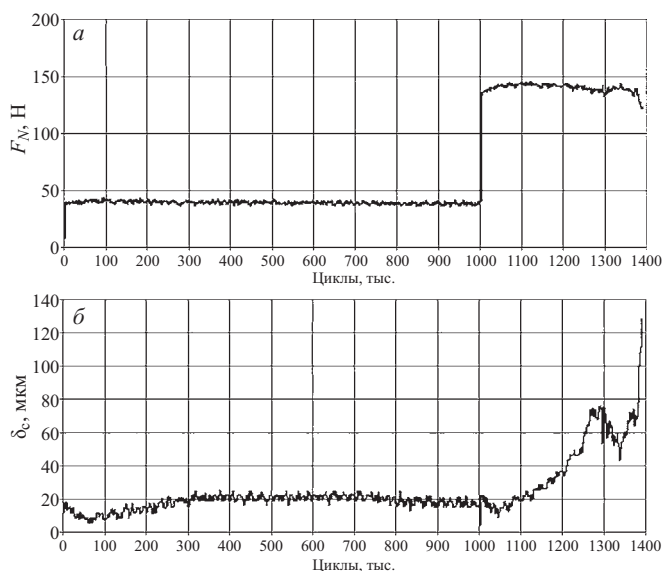


Рис. 7. Результаты испытаний образца-рельса

стей. Причем, если на первой ступени нагружения ($F_N = 40$ Н) график δ_c носит почти линейный характер, то с переходом на вторую ступень ($F_N = 130$ Н) происходит резкий и нерегулярный рост сближения осей, усиленный вибрациями. Это приводит к возникновению ударно-усталостного процесса. Предельное состояние наступает, когда величина δ_c достигает ~ 100 мкм (см. рис. 7, б).

На испытанном образце-рельсе после испытаний получено характерное повреждение — остаточная деформация и износ на дорожке качения; на этой дорожке обнаруживаются ямки выкрашивания. Все это аналогично картине повреждения при эксплуатации рельсов.

Таким образом, разработаны оригинальная конструктивная модель системы колесо/рельс и метод ее испытания в условиях, близких к эксплуатационным. Предложенный метод испытаний прошел апробацию. В дальнейшем планируется провести цикл экспериментальных исследований с использованием разработанной модели применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Литература

1. Фролов К. В., Махутов Н. А. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1995. Т. 61. № 5. С. 32 – 33.
2. Высоцкий М. С., Махутов Н. А., Корешков В. Н., Сосновский Л. А., Богданович А. В., Андронов П. В., Тюрин С. А., Марченко А. В. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1995. Т. 61. № 5. С. 35 – 38.
3. Махутов Н. А., Богданович А. В., Андронов П. В., Марченко А. В., Тюрин С. А., Сосновский Л. А. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1995. Т. 61. № 6. С. 17 – 42.
4. Богданович А. В. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. Т. 71. № 2. С. 41 – 46.
5. Красневский Л. Г., Сенько В. И., Андрияшин В. А., Тюрин С. А. / Труды 5-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3 – 7 октября 2005 г., Иркутск (Россия). — Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. Т. 1. С. 178 – 203.
6. Андрияшин В. А., Еловой О. М., Замятин В. О. / Надежность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. Вып. 25. — Киев: ИПП НАНУ им. Г. С. Писаренко, 2005. С. 54 – 63.
7. Белиц Ф. Ю., Богданович А. В., Высоцкий М. С. и др. Трибофатика-95: Ежегодник / Под общей ред. Л. А. Сосновского. Вып. 1. — Гомель: НПО «Трибофатика», 1996. — 80 с.