

# Прогноз износа профилей колес с использованием динамических моделей



**А. В. Саидова,**  
аспирант кафедры  
«Вагоны и вагонное  
хозяйство», Петербургский  
государственный  
университет путей  
сообщения (ПГУПС)



**А. М. Орлова,**  
доктор техн. наук,  
профессор, ПГУПС

Износ железнодорожного колеса определяется множеством факторов, не все из которых получили исследованы применительно к грузовым вагонам, эксплуатируемым на российских железных дорогах. Одним из определяющих степень износа параметров является коэффициент трения между колесом и рельсом, при этом установлено, что чем выше твердость, тем ниже износ трущихся поверхностей. Для расчета износа колес с повышенной твердостью обода с использованием модели абразивного износа Арчарда были проведены исследования, результатом которых стал обоснованный выбор коэффициента износа для сильной и слабой стадий в модели Арчарда и коэффициента трения на гребне и поверхности катания колеса.

**М**оделирование износа железнодорожного колеса является сложной задачей, требующей учета влияния на него большого количества факторов. Обзор литературы в данной области [1] показал отсутствие данных о параметрах износа при его моделировании для грузовых вагонов в условиях их эксплуатации на российских железных дорогах.

Целью работы являлся выбор коэффициента износа в модели Арчарда [2] и коэффициента трения между рельсами и колесами с использованием результатов испытаний в стационарных условиях экспериментального кольца ОАО «ВНИИЖТ». Колеса испытуемого вагона имели S-образную форму диска и упрочненную поверхность катания (твердость составляет 320–360 НВ) [3].

Выбор коэффициентов производился на основании сравнения величин износа гребней и поверхностей катания колес, полученных по результатам ресурсных пробеговых испытаний [4], с результатами многовариантных расчетов в программном комплексе «MEDYNA» [5].

## Результаты обмера профилей колес

Ресурсные пробеговые испытания проводились для одного вагонокомплекта тележек модели 18-9855, установленного под универсальным полувагоном с разгрузочными люками модели 12-9853, на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» (ст. Щербинка) путём включения испытуемого вагона в груженом до осевой нагрузки 25 тс

состоянии в состав грузового поезда. Опытный вагон в составе поезда следовал по второму кольцевому пути в одном направлении (по часовой стрелке) около 10 часов в сутки со средней скоростью 70 км/ч. Правый рельс являлся внутренним, а левый – наружным. При измерениях стороны вагона (правая и левая, передняя и задняя) были приняты по ходу движения поезда.

Обмер профилей колес производился с помощью профилометра ИКП-5 [6] методом лазерного сканирования в четырех сечениях поверхности катания колеса (через каждые 90°). Толщина гребня определялась как расстояние, измеренное по горизонтали на высоте 18 мм от вершины гребня. Прокат определялся как разность между измеренной на расстоянии 70 мм от наружной грани колеса высотой гребня и ее номинальным значением (28 мм).

Усредненные по четырем сечениям на каждом колесе значения износа поверхностей катания и гребней колес представлены в *таблице 1*.

Полученные для восьми колес вагона результаты измерения износа соответствуют хорошо обусловленным условиям испытаний экспериментального кольца ОАО «ВНИИЖТ» [7]: движение с постоянной загрузкой и скоростью по кривой одного радиуса в одном направлении с минимальным количеством торможений. В дальнейшем при выборе параметров в модели износа (коэффициент износа и коэффициент трения) минимизировалась разница между результатами расчетов и измерений.

Таблица 1. Средненные значения износа колес вагона после пробега 53,3 тыс. км по экспериментальному кольцу ВНИИЖТ

Колесная пара по ходу движения	Износ гребня колеса, мм		Износ поверхности катания (прокат) колеса, мм	
	набегающего (левого)	ненабегающего (правого)	набегающего (левого)	ненабегающего (правого)
Первая	3,8	0,3	1,2	1,1
Вторая	0,6	0,6	1,9	0,9
Третья	4,1	0,4	1,6	0,8
Четвертая	0,7	0,5	1,0	0,8

Таблица 2. Результаты измерения твердости

№ образца и точки	Твердость на поверхности катания		Твердость на гребне		Среднее значение твердости, НВ		Разница значений твердости на поверхности катания и гребне, %	
	HRC	НВ	HRC	НВ	на поверхности катания	на гребне		
1	1	35	331	22	237	274	236	13,5
	2	26	262	21	233			
	3	20	229	22	237			
2	1	17	217	17	217	220	218	1,4
	2	18	221	18	221			
	3	18	221	17	217			
3	1	23	241	21	233	271	236	12,9
	2	30	294	22	237			
	3	28	277	22	237			
4	1	29	285	26	262	295	257	12,9
	2	36	338	26	262			
	3	26	262	24	248			

**Результаты измерения твердости колес**

Как уже было отмечено, моделирование износа требует учета влияния различных факторов. Одним из определяющих является коэффициент трения между колесом и рельсом.

В работе [8] установлено, что сходимость результатов измерений и моделирования износов была получена при увеличении твердости на гребне и уменьшении твердости на поверхности катания колеса. Твердость определяет величину взаимного внедрения трущихся поверхностей и таким образом влияет на площадь фактического касания поверхностей и объем материала, втянутого в деформацию - чем больше твердость материалов, тем меньше износ поверхностей.

При моделировании разница твердостей в различных зонах колеса и рельса может быть задана различными коэффициентами трения для этих зон, т.к. износ зависит от тангенциальных (касательных) псевдопроскальзываний в пятне контакта, которые обратно пропорциональны коэффициенту трения скольжения. Известно, что для неизношенных новых колес разница значений твердостей обода, измеренных по периметру колеса, не должна превышать 20 НВ (8%) (согласно ГОСТ 10791-2011 [9]). В работе установлено соотношение твердости для колес, бывших в эксплуатации.

Из четырех предельно изношенных колес, изготовленных из стали марки 2, были вырезаны образцы (рис. 1) с отсутствием на поверхности выщерблин,

ползунов, трещин и других дефектов, которые могли бы оказать влияние на результаты измерения твердости.

Результаты измерения твердости образцов в трех точках на поверхности катания и гребне по методу Роквелла представлены в таблице 2.

Анализ результатов измерения показал, что твердость колес на поверхности катания больше таковой на гребне в среднем на 13% (данные, полученные для образца №2, были приняты как выброс значений). При многовариантных расчетах коэффициент трения на гребне варьировался в диапазоне на 10-20% больше, чем для поверхности катания.

**Выбор коэффициентов трения на основе результатов моделирования**

Разработанная математическая модель полувагона на тележках модели 18-9855 в программном комплексе «MEDYNA» подробно описана в [7]. Модель изнашивания, а также уточнение некоторых параметров в этой модели представлены в [10].

Многовариантные расчеты износа колес полувагона на тележках модели 18-9855 при движении по круговому пути радиусом 956 м со скоростью 70 км/ч (имитация условий пробеговых испытаний на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ», пробег около



Рис. 1. Образцы для измерения твердости

Таблица 3. Невязка результатов расчета и эксперимента

Колесо в колесной паре по ходу движения	Износ, мм, полученный по результатам				Расхождение результатов, %		
	измерений для		расчета для		гребень	поверхность катания	
	гребня	поверхности катания	гребня	поверхности катания			
1	набег.	3,8	1,2	3,5	1,3	7,9	8,3
	ненабег.	0,3	1,1	0,8	1	<b>166,7</b>	9,1
2	набег.	0,6	1,9	0,6	0,8	0,0	<b>57,9</b>
	ненабег.	0,6	0,9	0,8	1	33,3	11,1
3	набег.	4,1	1,6	3,4	1,1	17,1	31,3
	ненабег.	0,4	0,8	0,9	1	<b>125,0</b>	25,0
4	набег.	0,7	1,0	2,6	0,8	<b>271,4</b>	20,0
	ненабег.	0,5	0,8	0,5	1	0,0	25,0

50 тыс. км.) проводились для коэффициентов износа в диапазоне от 10<sup>-7</sup> г/Н•м до 10<sup>-5</sup> г/Н•м и коэффициентов трения между колесом и рельсом в диапазоне от 0,1 до 0,5 (границы выбраны на основании [1]). Ширина колеи принималась равной 1520 мм.

По результатам моделирования построены диаграммы зависимости износа поверхности катания и гребня колеса от коэффициентов износа и трения между колесом и рельсом, позволяющие выбрать наилучшую пару значений. На рис. 2 представлены диаграммы износа, построенные для левого колеса первой колесной пары.

Сходимость результатов расчета с результатами эксперимента была получена при коэффициенте трения между гребнем колеса и боковой гранью рельса 0,30, поверхностью катания и головкой рельса 0,25; коэффициентом износа для сильной стадии 1,9•10<sup>-6</sup> г/Нм и 1,3•10<sup>-6</sup> г/Нм для слабой. Переход от одной стадии изнашивания к другой осуществлялся при значении отношения мощности сил трения в пятне контакта колеса с рельсом к его площади 0,7 МВт/м<sup>2</sup>, [10].

Расхождение результатов расчета и эксперимента представлено в таблице 3.

По двенадцати контрольным точкам расхождение результатов расчета и эксперимента не превысило 33%, однако для износа гребней ненабегających колес первой и третьей и набегающего четвертой колесной пары расхождение превысило 100%.

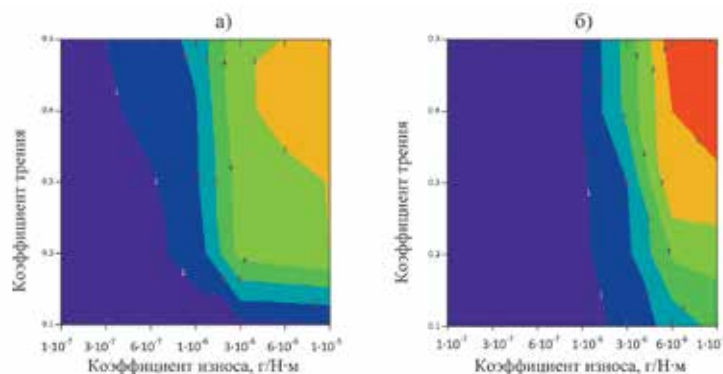


Рис. 3.3.2. Графики зависимости линейного износа, мм, левого колеса первой по ходу движения колесной пары от коэффициентов износа и трения: а) на гребне; б) на поверхности катания

В работе [11] показано, что сочетание допусков на изготовление тележки может вызывать рост темпа износа до 6,2 мм на 10 тыс. км. при среднем темпе износа 1,1 мм, т.е. более чем в 5 раз. Предположительно в эксперименте наблюдалось это явление.

По результатам выполненных исследований для расчета износа колес с повышенной твердостью обода с использованием модели абразивного износа Арчарда установлены следующие параметры:

- коэффициент износа 1,9•10<sup>-6</sup> г/Н•м для стадии сильного износа;
- коэффициент износа 1,3•10<sup>-6</sup> г/Н•м для стадии слабого износа;
- отношение мощности сил трения в пятне контакта колеса с рельсом к его площади, соответствующее переходу от слабого износа к сильному, 0,7 МВт/м<sup>2</sup>;
- коэффициент трения на поверхности катания 0,25;
- коэффициент трения на гребне 0,30.

**Литература**

1. Классификация работ в области расчетных и экспериментальных методов определения износа профилей колес грузовых вагонов / Орлова А.М., Саидова А.В. // Тез. докладов международной научно-технической конференции: Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты (06.07-10.07.2011), ПГУПС. СПб.: ПГУПС, 2011. С. 49–50.
2. Contact and rubbing of flat surfaces / Archard J. F. // J. Appl. Phys., 1953, vol. 24, no. 8, pp. 981–988.
3. ТУ 0943-170 -01124323-2010 Колеса цельнокатанные с криволинейной формой диска для грузовых вагонов с нагрузкой на ось до 30 тс. Технические условия.
4. Двухосная трехэлементная тележка для грузовых вагонов колеи 1520 мм с осевой нагрузкой 25 тс модели 18-9855: протокол ресурсных пробеговых испытаний (заключит.): ОАО «НВЦ «Вагоны»; рук. Бороненко Ю. П. СПб., 2011. 58 с. Исполн.: Лесничий В. С., Сухих И. В., Юрьева Е. И., Карпушина Е. В. Библиогр.: С. 29.
5. Лесничий В. С., Орлова А. М. Компьютерное моделирование задач динамики железнодорожного подвижного состава. Часть 3: Моделирование динамики грузовых вагонов в программном комплексе MEDYNA: учеб. пособие. СПб.: ПГУПС, 2002. 35 с.
6. Лазерный профилометр поверхности катания колесной пары. Серия ИКП. Руководство по эксплуатации – ООО «РИФТЭК» Минск, 63 с.
7. Саидова А.В., Орлова А.М. Разработка математических моделей вагонов на тележках 18-9810 и 18-9855 для исследования износов колес // Тез. докладов XIII международной конференции: Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава и энергосбережение. (23.05-25.05.2012) / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2012. С. 128–129.
8. W. Kik, D. Moelle. Parallel or on-line simulation of wear using general wheel rail element // Presentation of 4th VI-grade Users' Conference (18.10-19.10.2011) / Udine, Italy. URL: [http://www.vi-grade.com/index.php?pagid=4th\\_vigrade\\_conference](http://www.vi-grade.com/index.php?pagid=4th_vigrade_conference).
9. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатанные. Технические условия. Введ. 2012-01-01. М.: Стандартиформ, 2011. 33 с.
10. Саидова А.В., Орлова А.М. Уточнение некоторых параметров модели изнашивания колес грузового вагона // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб, ПГУПС. 2013. №1 (34). С. 147–151.
11. Орлова А.М., Артамонов Е.И. Влияние параметров, характеризующих состояние тележек грузовых вагонов, на боковой износ гребней колес // Транспорт Урала. Екатеринбург, УрГУПС. 2008. №3 (18). С. 36–40.