

А. М. ОРЛОВА, В. С. ЛЕСНИЧИЙ, Е. И. АРТАМОНОВ (ОАО «НВЦ «Вагоны», Российская Федерация)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА БОКОВОЙ ИЗНОС ГРЕБНЕЙ КОЛЕС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЯ ВАГОНОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

У статті викладені результати математичного моделювання зносу гребеня колеса вантажного вагона в залежності від стану візка (зносостійкий профіль колеса, різниця баз по двох сторонах, знос клинів, різниця діаметрів коліс), а також результати обстеження візків в експлуатації. Отримані кореляційні залежності параметрів дозволили оцінити ефективність заходів зі зниження бокового зносу гребенів коліс.

В статье изложены результаты математического моделирования износа гребня колеса грузового вагона в зависимости от состояния тележки (износостойкий профиль колеса, разность баз по двум сторонам, износ клиньев, разность диаметров колес), а также результаты обследования тележек в эксплуатации. Полученные корреляционные зависимости параметров позволили оценить эффективность мер по снижению бокового износа гребней колес.

In the article the results of mathematical simulation of flange wear of freight wagon wheel in dependence on the bogie conditions (wear-resistant wheel profile, difference of bases on both sides, wear of wedge, difference of diameters of wheels) as well as the results of survey of bogies under operation are presented. The obtained correlation relationships of parameters allowed to estimate the efficiency of measures on reducing the side wear of wheel flanges.

Проблеме выявления причин повышенного износа гребней колес в тележках модели 18-100, эксплуатирующихся под грузовыми вагонами, посвящено огромное количество работ. В качестве основных причин этого явления, возникновения которого соответствует восьмидесятым-девяностым годам 20 века, различными авторами предлагались: переход с ширины колеи 1524 мм на ширину колеи 1520 мм, переход с буксовых подшипников скольжения на подшипники качения, повышенное или недостаточное сопротивление повороту тележки под вагоном, недостаточный контроль при ремонте за геометрией тележек в плане и т.д. В данной работе по результатам математического моделирования движения грузового вагона и обследования тележек в эксплуатации предлагается подход к статистической оценке эффективности мероприятий по ужесточению параметров содержания ходовых частей для снижения бокового износа гребней колес.

1. Математическая модель движения грузового вагона и износа профиля колеса

Для исследования влияния состояния тележек на боковой износ гребня с использованием программного комплекса MEDYNA разработа-

на математическая модель движения полувагона с осевой нагрузкой 23,5 т на тележках модели 18-100 [1], характеризующаяся нелинейным описанием взаимодействия бруса – боковая рама, надрессорная балка – клин, клин – боковая рама, пятник – подпятник, боковых скользунов, с учетом сухого трения и ограничения перемещений. Механическая схема использованных элементов сухого трения представлена на рис. 1.

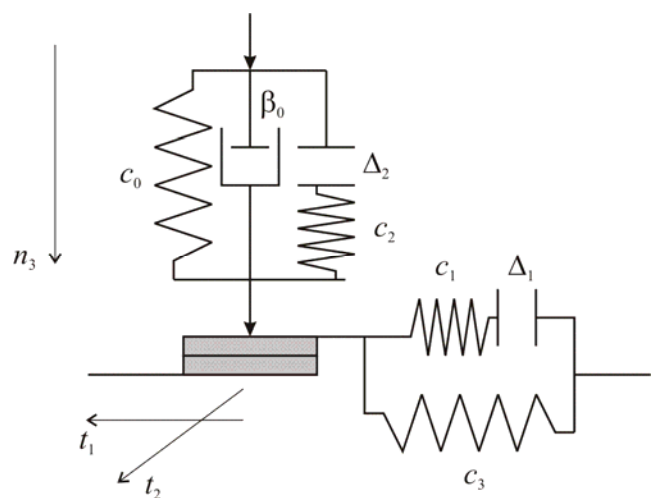


Рис. 1. Механическая схема нелинейного элемента, описывающего работу узлов трения

Контакт колеса с рельсом описывался безмассовым элементом связи, интегрированным в программный комплекс [2] без ограничения на количество пятен контакта. Форма пятна контакта (неэллиптическая), нормальные напряжения и результирующая нормальная сила определялись по взаимному проникновению контактирующих профилей методом Кика-Пиотровски [3], а компоненты крипа и спина – в соответствии с алгоритмом Калкера [2].

Вычисление износа основывалось на теории абразивного износа в соответствии с [4, 5]. Объем изношенного материала пропорционален работе сил трения, причем различаются фазы слабого и сильного износа. Коэффициент пропорциональности между массой изношенного материала и работой сил трения при слабом износе был принят равным $2,25 \cdot 10^{-7}$ г/(Н·м), а при сильном износе $6,25 \cdot 10^{-7}$ г/(Н·м). Мощность сил трения в пятне контакта, отнесенная к его площади, при которой происходит переход от слабого износа к сильному, составляла $4 \cdot 10^6$ Вт/м².

Для расчета износа использовался параллельный дискретный алгоритм. Параллельно производилось вычисление на двух моделях: динамической модели движения экипажа и модели вычисления износа колес. На каждом шаге интегрирования динамической модели вычислялась мощность сил трения в пятнах контакта, которая передавалась в модель вычисления износа. В модели износа вычислялся объем изношенного материала, распределенный по профилю колеса, при этом принималось, что на каждом шаге интегрирования колесо совершает один оборот, и накопленный износ равномерно распределяется по окружности колеса. Вычисленный изношенный профиль передавался в динамическую модель движения, где с ним осуществляется следующий шаг интегрирования.

2. Условия выполнения расчетов и результаты математического моделирования износа

В качестве базового варианта выполнены расчеты для груженого полувагона на тележках модели 18-100 в среднем состоянии (занижение фрикционных клиньев 5 мм, суммарный зазор в буксовом проеме 10 мм вдоль и 9 мм поперек, колесные пары расположены соосно, зазоры в скользунах 8 мм). При начальных условиях ва-

гон имел профили колес по ГОСТ 9036, в процессе интегрирования различались профили колес первой, второй, третьей и четвертой по ходу движения колесных пар (профили колес справа и слева на каждой колесной паре были идентичными).

Расчет износа профилей колес производился при движении по прямой, а также в круговых кривых постоянного радиуса и возвышения наружного рельса для пробега 20 тыс. км. В качестве представительных выбраны кривые радиусом 350 и 650 м с возвышением наружного рельса 100 мм. Расчет производится для скоростей движения: 90 км/ч в кривой радиусом 650 м и в прямой; 60 км/ч в кривой радиусом 350 м. Профиль рельса в прямых участках пути был принят с вертикальным износом 2 мм, в кривых – с боковым износом 6 мм. Реализации случайных неровностей принимались в соответствии с [6].

В качестве основного варьируемого параметра была принята ширина рельсовой колеи, которая изменялась в диапазоне от 1510 мм до 1550 мм. При этом величина зазора в колее (на сторону) при начальных условиях изменялась от 2 до 22 мм.

Боковой износ гребня оценивался суммарной (по всем колесным парам) приведенной (по типам участков пути) величиной по формуле:

$$f_{np} = P_{straight} \sum f_i^{straight} + P_{650} \sum f_i^{650} + P_{350} \sum f_i^{350}, \quad (1)$$

где $P_{straight}$, P_{650} , P_{350} – вероятности движения в прямой, кривой среднего и малого радиуса, соответственно; $f_i^{straight, 650, 350}$ – боковой износ гребня в колесной паре с номером i на прямом участке пути, в кривой радиусом 650 м и 350 м, соответственно. Вероятности движения по различным участкам пути были приняты равными $P_{straight} = 0,75$; $P_{650} = 0,20$; $P_{350} = 0,05$.

Зависимость суммарного приведенного бокового износа гребня от ширины рельсовой колеи для базового варианта приведена на рис. 2. С увеличением ширины рельсовой колеи боковой износ гребней колес снижается, например, при изменении ширины колеи от 1520 мм до 1530 мм – на 30 %, от 1520 до 1525 мм – на 20 %.

Таким образом, изменение ширины рельсовой колеи само по себе не является причиной многократного роста бокового износа гребня.

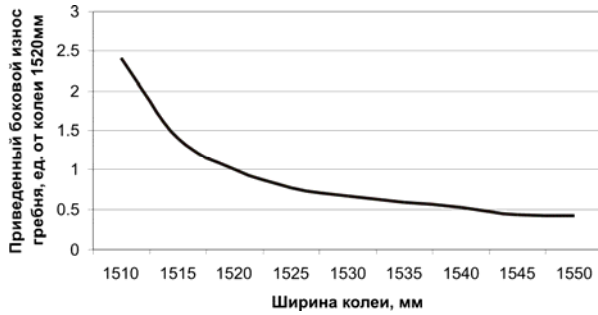


Рис. 2. Зависимость суммарного приведенного бокового износа гребня от ширины рельсовой колеи для базового варианта

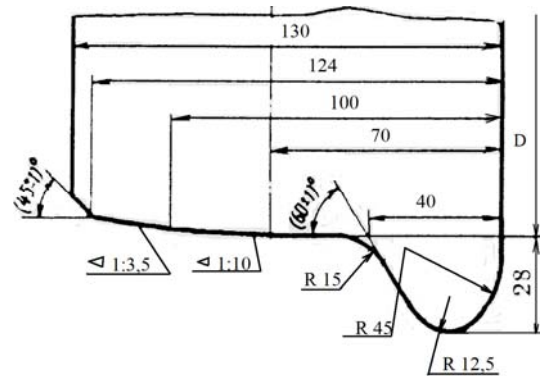
На первом этапе с базовым вариантом сравнивалось использование тележек модели 18-578. Момент сопротивления повороту тележки модели 18-100 под вагоном составил 10,5 Н·м, в тележке модели 18-578 этот момент увеличен до 17,1 Н·м за счет использования боковых скользунов постоянного контакта. Кроме того, боковые скользуны постоянного контакта в тележке модели 18-578 обеспечивают упругое сопротивление перевалке на пятнике, а прогиб пружин подвешивания под брутто вагона увеличен на 19 мм. Тележка модели 18-578 рассматривалась с профилем колес по ГОСТ 9036 (рис. 3а) и с износостойким профилем по ГОСТ 11018 (рис. 3б), отличающимся формой и углом наклона гребня.

Зависимость суммарного приведенного бокового износа гребня от ширины рельсовой колеи для тележки модели 18-578 в сравнении с базовым вариантом приведена на рис. 4. Применение тележек модели 18-578 с профилями колес по ГОСТ 9036 не приводит к существенному изменению бокового износа гребня, при обточке колес по профилю ГОСТ 11018 износ снижается на 10...30 %, причем тем значительнее, чем больше ширина рельсовой колеи.

При рассмотрении влияния завышения клиньев на износ колес было принято, что все клинья в тележках имеют одинаковое завышение, равное 5 мм, которое обеспечивает соответствующее снижение демпфирования колебаний и снижение сопротивления тележки забеганию боковых рам на 18 %. При рассмотрении влияния несоосности колесных пар было принято, что первая и третья колесные пары имеют углы набегания 1,75 мрад (разность баз тележки справа и слева 3,5 мм), а разность баз боковых рам справа и слева составляет 4 мм при одинаковых зазорах в буксовых проемах.

Зависимость суммарного приведенного бокового износа гребня от ширины рельсовой колеи для тележки модели 18-100 с завышением фрикционных клиньев и несоосностью колесных пар в сравнении с базовым вариантом приведена на рис. 5. Равномерное завышение клиньев в тележке практически не влияет на боковой износ гребня, а наличие несоосности колесных пар приводит к его росту в 1,6...2,0 раза.

а)



б)

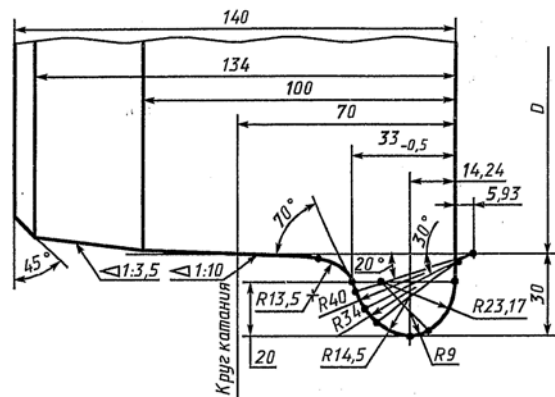


Рис. 3. Геометрия профилей: а) ГОСТ 9036-88; б) ГОСТ 11018-2000

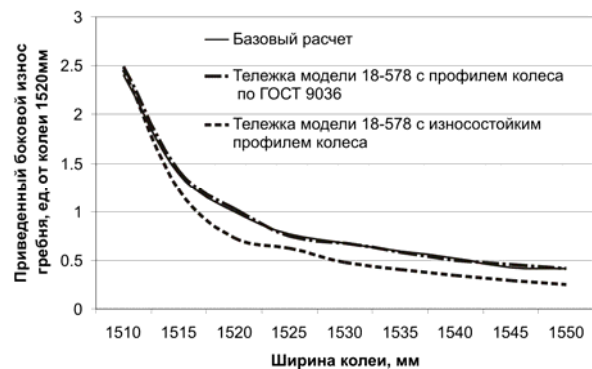


Рис. 4. Зависимость суммарного приведенного бокового износа гребня от ширины рельсовой колеи для тележки модели 18-578 в сравнении с базовым вариантом

Разность диаметров колес в колесных парах рассматривалась в двух вариантах. Сначала все колеса по одной стороне вагона имели диаметр на 2 мм меньше, чем по другой, а затем колеса меньшего диаметра располагались по диагонали в каждой тележке. Результаты, представленные на рис. 6, показывают увеличение бокового износа гребня в 1,2...5,0 раз, причем большая цифра соответствует колесам меньшего диаметра по одной стороне вагона.

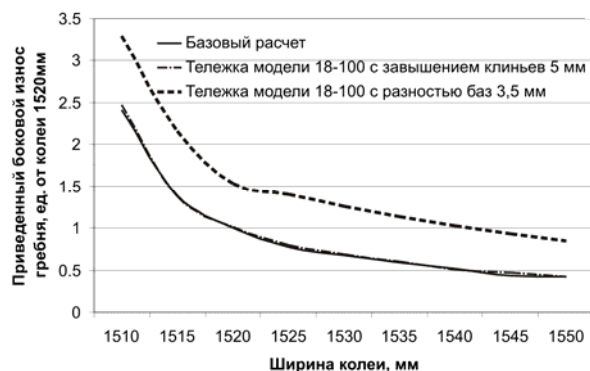


Рис. 5. Зависимость суммарного приведенного бокового износа гребня от ширины рельсовой колеи для тележки модели 18-100 с завышением клиньев и несоосностью колесных пар в сравнении с базовым вариантом

По результатам расчета можно ожидать, что при случайном расположении колес разных диаметров в вагоне и тележке, влияние этого фактора на боковой износ гребня становится незначительным.

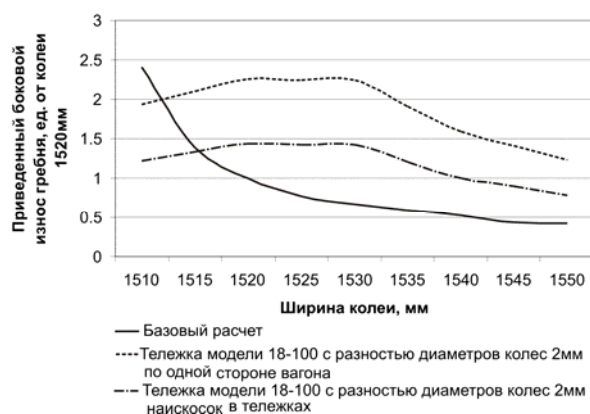


Рис. 6. Зависимость суммарного приведенного бокового износа гребня от ширины рельсовой колеи для тележки модели 18-100 с разностью диаметров колес в сравнении с базовым вариантом

Результаты, полученные методами численного моделирования, позволили количественно оценить влияние некоторых параметров содержания тележек на боковой износ гребня в зависимости от ширины рельсовой колеи. Экспериментальному выявлению аналогичных зависимостей посвящен следующий раздел.

3. Обследование тележек в эксплуатации и выявление корреляционных зависимостей между параметрами их содержания и боковым износом гребня

На втором этапе обследованы находящиеся в эксплуатации тележки магистральных грузовых вагонов модели 18-100, модернизированные по проекту М 1698, в количестве 200 шт. и выполнен расчет коэффициентов корреляции между параметрами, характеризующими состояние тележек и колесных пар.

Измерению на колесных парах подвергались расстояние между внутренними гранями колес, диаметры колес, толщина гребня. Соответственно на тележках измерялись расстояние от рабочей поверхности подвижной фрикционной планки (контактной планки) до центра буксы ближайшей колесной пары; расстояние от рабочей поверхности подвижной фрикционной планки (контактной планки) до наружной упорной поверхности буксового проема; зазоры между наружной упорной поверхностью челюстного проёма и корпусом буксы, а также внутренней упорной поверхностью и корпусом буксы; завышение (занижение) клиньев, база тележки по двум сторонам, зазоры в скользунах.

По результатам обмеров установлена наиболее вероятная конфигурация тележки в плане (рис. 7), которая характеризуется «забеганием» боковых рам (за счет неодинакового завышения фрикционных клиньев) и разностью баз по положению осей колесных пар 4,5 мм. Таким образом, в среднем все тележки грузовых вагонов имеют непараллельную установку колесных пар, а неодинаковое завышение фрикционных клиньев приводит к расположению боковых рам, поддерживающих такое размещение колесных пар.

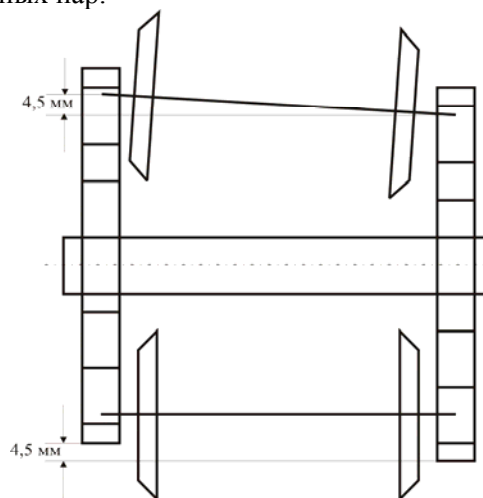


Рис. 7. Представительная конфигурация тележки в плане

Средняя интенсивность бокового износа гребня составила 1,09 мм на 10 тыс. км пробега, а максимальное значение достигало 6,2 мм/10 тыс. км.

Коэффициенты корреляции и количественное влияние разных факторов на интенсивность бокового износа гребня показано в табл. 1.

Изменение ширины колесной колеи (расстояние между внутренними гранями колес плюс толщины гребней) на 1 мм оказывает наибольшее количественное влияние на интенсивность среднего бокового износа гребней колесной пары. Уменьшение ширины колесной колеи на 16 мм (расстояние между внутренними гранями колес 1437 мм и толщина гребня 28 мм в сравнении с расстоянием 1443 мм и толщиной гребня 33 мм) приводит к росту зазора между колесом и рельсом и снижению интенсивности бокового износа гребней на 1,44 мм/10 тыс. км, однако, корреляционная зависимость «слабая» с коэффициентом 0,23.

По аналогии с расчетным результатом, полученным для увеличения ширины рельсовой колеи на 5 мм, о снижении бокового износа на 20 %, уменьшение ширины колесной колеи на 5 мм может привести к снижению износа на 7...40 % в зависимости от сочетания других параметров в тележке.

При увеличении поджатия подклиновых пружин на 1 мм за счет изменения уровня клиньев относительно надрессорной балки интенсивность среднего бокового износа гребней колес уменьшается на 0,02 мм/10 тыс. км, причем корреляционная зависимость «сильная» с коэффициентом 0,53. Отличие от результатов расчета заключается в том, что там рассматривалось одинаковое для всех клиньев завывшение, которое влияло на демпфирование колебаний и связанность боковин в плане. По результатам обмеров было установлено, что в эксплуатации в основном наблюдается неодинаковое завывшение клиньев в тележке, установка надрессорной балки относительно боковых рам идет с перекосом, что далее вызывает перекося колесных пар.

При уменьшении разности зазоров в скользунах тележки (комплексный показатель, в целом характеризующий соотношение в тележке таких параметров, как разность диаметров колес, износ опорных поверхностей буксового проема, неравномерный износ фрикционных клиньев, износ подпятника и скользунов) на 1 мм интенсивность среднего бокового износа гребней колес уменьшается на

0,03 мм/10 тыс. км, причем корреляционная зависимость «средняя» с коэффициентом 0,39.

Таблица 1

Изменение интенсивности бокового износа гребней колес при изменении параметров содержания тележек и колесных пар

Изменяемый параметр содержания	Возможный диапазон изменения при выходе вагона из депо, мм	Величина изменения параметра содержания, мм	Величина изменения интенсивности среднего бокового износа гребней колесной пары, мм/10 тыс. км	Коэффициент корреляции
Ширина колесной колеи	16 (1440 ⁺³ + 2·28 ⁺⁵)	- 1	- 0,09	0,23
Среднее завывшение клиньев в тележке	11 (-8...+3)	- 1	- 0,02	0,53
Разность баз тележки справа и слева при прижатии колесных пар к наружному углу буксового проема	11 (разность баз боковых рам не более 2, зазор в буксовом проеме 6...15)	- 1	- 0,01	0,22
Разность зазоров в скользунах тележки	16	- 1	- 0,03	0,39

При уменьшении возможной разности баз в тележке при прижатии колесных пар к наружному углу буксового проема (определяется разностью баз боковых рам и продольными зазорами в буксовых проемах) на 1 мм интенсивность среднего бокового износа гребней колес уменьшается на 0,01 мм/10 тыс. км, причем корреляционная зависимость «слабая» с коэффициентом 0,22.

Выявленное при обследовании вагонов в эксплуатации влияние параметров содержания тележек на боковой износ гребней колесных пар носит статистический характер, поэтому для оценки одновременного влияния различных факторов разработана приведенная ниже методика.

4. Оценка эффективности мероприятий по уменьшению износа гребней колес

Разработанная методика оценки эффективности мероприятий по уменьшению износа гребней колес основана на вычислении приведенного к парку тележек изменения интенсивности износа гребня с использованием плотностей распределения параметров тележек и их корреляции.

Рассмотрим эффективность ограничения параметра q_j , имеющего в эксплуатации плотность распределения p_j (рис. 8), в диапазоне до q^* . Каждому диапазону Δq_{ij} , имеющему вероятность попадания параметра p_{ij} , соответствует изменение темпа износа гребня колеса равное $(\partial \dot{f} / \partial q_j) \Delta q_{ij}$, где $\partial \dot{f} / \partial q_j$ - производная интенсивности износа гребня по параметру, численно определенная при обследовании тележек (например, табл. 1).

Приведенное изменение интенсивности износа гребня при ограничении параметра q_j до q^* составит:

$$\Delta \dot{f}_j = \frac{\partial \dot{f}}{\partial q_j} \sum_i p_{ij} \cdot \Delta q_{ij} . \quad (2)$$

В предположении, что все параметры, измеренные на тележках, являются независимыми, полное изменение интенсивности износа гребня при введении ограничений на несколько параметров вычисляется суммированием приведенных изменений для каждого параметра.

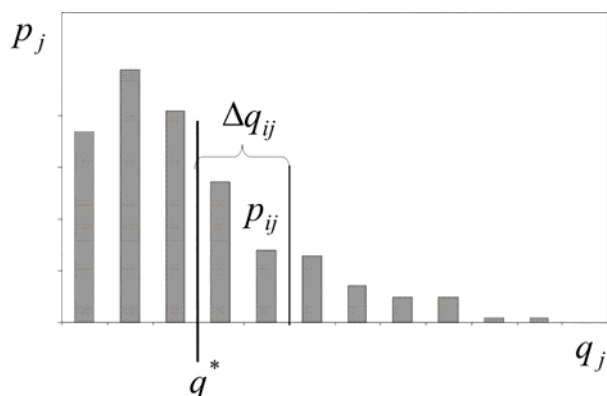


Рис. 8. Плотность распределения параметра q_j

Среди параметров, характеризующих тележки, имеются нормируемые при выходе из деповского ремонта величины. Отклонение от норматива было выявлено по следующим величинам: завышение клиньев более 3 мм у 8,5 %

тележек; продольный зазор в буксовом проеме более 15 мм у 3,6 % тележек; разность баз боковых рам более 2 мм у 81,5 % тележек; суммарный зазор в скользунах более 16 мм у 16 % тележек. Для всех этих параметров, кроме последнего, выявлена значительная корреляция с износом гребней и оценена эффективность обеспечения нормативов, назначенных при выходе из деповского ремонта (вариант 1).

Во втором варианте оценена эффективность мер по ужесточению допусков на параметры, контролируемые при выходе из деповского ремонта, а именно: ограничения завышения клиньев до 0 мм; ограничения продольного зазора в буксовом проеме до 10 мм при соблюдении требования к разности баз тележки при прижатии колесных пар к наружному углу буксового проема 2 мм.

В третьем варианте оценена эффективность мер по введению дополнительных к варианту 2 параметров, контролируемых при выходе из деповского ремонта, а именно: разности зазоров в буксовом проеме на одной колесной паре не более 4 мм; разности зазоров в скользунах тележки не более 3 мм; разности полубаз боковых рам на одной колесной паре (перекос колесной пары относительно наддрессорной балки) не более 2 мм.

В четвертом варианте рассмотрены те же параметры, что в варианте 3, но с очень жесткими ограничениями, которых можно добиться только при изменении технологии изготовления тележек и вагонов (в части скользунов).

Кроме того, оценена эффективность ограничения расстояния между внутренними гранями колес до 1440 мм с допуском -3 мм.

Результаты оценки эффективности мероприятий по уменьшению износа гребня показали, что:

1. Обеспечение завышения фрикционных клиньев до 3 мм, продольного зазора в буксовом проеме до 15 мм и разности баз тележки при прижатии букс наружу проемов до 2 мм (на уровне нормативов при выходе из деповского ремонта) позволяет прогнозировать приведенное на парк тележек снижение интенсивности износа гребня на 0,56 мм/10 тыс. км;
2. Введение более жестких ограничений на завышение клиньев до 0 мм, продольный зазор в буксовом проеме до 10 мм и разность баз до 2 мм позволяет прогнозировать приведенное на парк тележек снижение интенсивности износа гребня на 0,86 мм/10 тыс. км;

3. Введение дополнительно к ограничениям по п. 2 требований к разности зазоров в буксовых проемах одной колесной пары до 4 мм, разности зазоров в скользунах тележки до 3 мм позволяет прогнозировать приведенное на парк тележек снижение интенсивности износа гребня на 0,91 мм/10 тыс. км;
4. Введение ограничений, связанных с изменением технологии изготовления тележки, а именно занижение клиньев более 5 мм, продольный зазор в буксовом проеме не более 4 мм, разность баз боковых рам не более 2 мм, разность зазоров в буксовых проемах одной колесной пары не более 1 мм, разность зазоров в скользунах не более 1 мм, позволяет прогнозировать приведенное на парк тележек снижение интенсивности износа гребня на 3,05 мм/10 тыс. км.

Таким образом, для значительного уменьшения износа гребней колес необходимо существенное изменение технологии изготовления и ремонта тележек, позволяющих обеспечить повышенные требования к допускам на завышенные клинья, продольный зазор в буксовом проеме и их разность на одной колесной паре, разность баз боковых рам, разность зазоров в скользунах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесничий, В. С. Компьютерное моделирование задач динамики железнодорожного подвижного состава. Ч. 3: Моделирование динамики грузовых вагонов в программном комплексе MEDYNA: учеб. пособие [Текст] / В. С. Лесничий, А. М. Орлова. – СПб.: ПГУПС, 2002. – 35 с.
2. Medyna / Arge Care, Computer Aided Railway Engineering. Руководство пользователя [Текст] / под. ред. Ю. П. Бороненко. – СПб.: НВЦ «Вагоны», 1997. – 8 кн.
3. Kik, W. A fast, approximate method to calculate normal load at contact between wheel and rail and creep forces during rolling [Текст] / W. Kik, J. Piotrowski // I. Zobory (Ed.), Proc. of the 2nd Mini-Conf. of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. – Budapest (Hungary).
4. Archard, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces [Текст] / J. F. Archard // J. Appl. Phys.. – 1953. – Vol. 24, No. 8. – P. 981-988.
5. Kragelsky, I. V. Friction and wear. Calculation methods [Текст] / I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin, V. S. Kombalov. – Pergamon Press, 1982.
6. РД 32.68-96. Руководящий документ. Расчётные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов [Текст]. – Введ. 01.01.97. – М.: ВНИИЖТ, 1996. – 17 с.

Поступила в редколлегию 23.06.2008.