

Колеса

с резиновой амортизацией

Колесо является важным компонентом ходовой части безопасного, экономичного и экологичного железнодорожного транспорта. Применение в его конструкции резиновых амортизирующих элементов предлагалось еще в середине XIX в. Кольца из резины, помещаемые между бандажом и колесным центром, воспринимают колесную нагрузку и препятствуют передаче на колесный центр вибраций горизонтального и радиального направлений.

История разработки колес с резиновой амортизацией знает много вариантов исполнения, которые можно условно разделить на четыре основные группы (рис. 1):

- с одним резиновым кольцом (рис. 1, а);
- с двумя или большим числом резиновых колец (рис. 1, б);
- с пневмоамортизацией (рис. 1, в);
- полностью подрезиненное колесо (рис. 1, г).

У колес с одним резиновым кольцом радиальный упругий прогиб вызывается преимущественно приложением сил сжатия, воздействующих на амортизирующие элементы. Как показывает практика, этот прогиб не превышает 1 мм. В конструкциях с двумя или большим числом резиновых колец, когда амортизирующие элементы в большей мере воспринимают силы сдвига, упругий прогиб может достигать 5 мм и более. В связи с этим колеса такого типа можно использовать в концепции тележек без первичного рессорного подвешивания.

Особое место занимают колеса с пневмоамортизацией, у которых между стальным ободом колеса и колесным центром располагается пневматический элемент. Он может также располагаться на поверхности катания колеса в виде пневмошины и контактировать с рельсом. Эти варианты колес получили ограниченное применение,

например в вагонах парижского метрополитена.

Колеса со сплошным резиновым ободом, непосредственно находящимся в контакте с рельсом, только в редких случаях способны воспринять требуемую колесную нагрузку.

После Первой мировой войны было разработано много разнообразных конструкций колес с резиновой амортизацией. Однако лишь немногие из них нашли применение на практике. Основными причинами этого были проблемы обеспечения необходимой прочности, в частности в конструкциях с резьбовыми, клепаными или сварными соединениями, неблагоприятное распределение сил в амортизирующих элементах, связанное с их неудовлетворительными упругими свойствами, перегрузки резиновых элементов, деформации ползучести и просадки, а также слишком ограниченный срок службы.

Можно упомянуть также проведенные в 1933 г. исследования зависимости между прогибом амортизирующего элемента и ускорениями при ударе, результаты которых подтвердили целесообразность применения колес с резиновыми амортизаторами в вагонах трамвая.

В 1934 г. была запатентована идея колеса с двумя резиновыми кольцами (колесо типа SAB). Оно до сих пор используется в ходовой части вагонов пригородных поездов и тяжелых локомотивов. Основным недостатком этой конструкции является ее высокая стоимость и увеличенные размеры.

В начале 1950-х годов в техническом центре г. Бохум (Германия) было разработано простое и надежное колесо нового типа, которое получило обозначение В0 54 (рис. 2). Это колесо состоит только из двух стальных деталей, между которыми находится упругое кольцо, состоящее из отдельных резиновых элементов. Резьбовые крепежные детали в конструкции колеса отсутствуют. Монтаж осуществляется гидравлическим запрессовочным приспособлением, с помощью которого заранее установленные в выемках внутренней стороны обо-

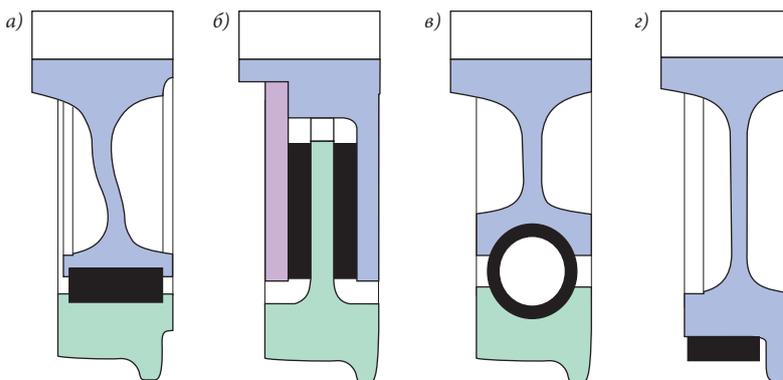


Рис. 1. Принципиальные концепции колес с резиновой амортизацией

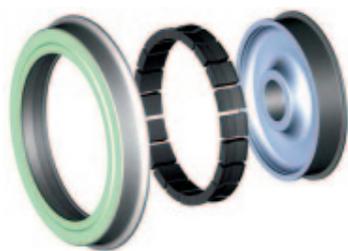


Рис. 2. Колесо типа Vo 54

да резиновые элементы вдавливаются на 50% своей высоты и оказываются в одной плоскости с поверхностью запрессованного колеса центра. После этого прессовая нагрузка снимается и сохраняется окончательная степень преднапряжения, составляющая около 30%. Бортики на обеих стальных деталях колеса обеспечивают возможность резиновым элементам воспринимать горизонтальные нагрузки.

Колеса этого типа быстро получили широкое распространение и были обязательными при использовании тягового привода DÜWAG, который имеет большие неподрессоренные массы, в связи с чем его нельзя было применять без наличия первой ступени рессорного подвешивания. Ввиду постоянно растущих требований колеса данного типа непрерывно совершенствовались, появилось много модификаций этой конструкции.

Более 200 тыс. таких колес используются на железных дорогах мира, в том числе в вагонах метрополитена и трамвая с пониженным уровнем пола. В качестве амортизаторов, как и прежде, применяются элементы из резины, поэтому понятие «колесо с резиновой амортизацией» по-прежнему сохраняет свое первоначальное значение. Эксперименты с другими материалами, например эластомерами на основе полиуретана, успеха не имели.

Аргументы за и против

Применение колес с резиновой амортизацией, особенно на рельсовом транспорте городского и местного сообщения, обосновывается

необходимостью прокладки трасс в стесненных условиях с кривыми малого радиуса, в непосредственной близости от жилых домов. Такие колеса здесь имеют следующие преимущества:

- снижение шумовой нагрузки, особенно при прохождении кривых (рис. 3). Ввиду возросших экологических требований одни только колеса с резиновой амортизацией не в состоянии полностью решить проблему снижения шума до нужного уровня. Необходимо применение таких дополнительных элементов, гасящих шум, как колесные абсорберы и шумопоглощающие кольца. Колеса с резиновой амортизацией также значительно снижают уровень шума от качения колес по рельсам. К сожалению, окончательная оценка эффективности применения таких колес на пригородном подвижном составе с его диапазоном скорости с этой точки зрения еще не дана;

- снижение ускорения при ударах и связанных с этим механических нагрузок на компоненты подвижного состава и путь, уменьшение вибраций верхнего строения пути и зданий прилегающих жилых территорий за счет снижения величины неподрессоренных масс;

- уменьшение износа поверхности катания колес, особенно в зоне гребня, благодаря чему из-за снижения сил взаимодействия между колесом и рельсом увеличивается величина пробега между обточками колесных пар;

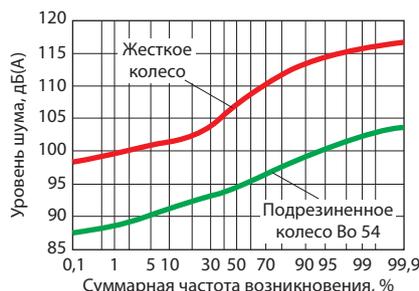


Рис. 3. Сравнение уровней шума, издаваемого жесткими и подрезиненными колесами в кривой радиусом 65 м на сети метрополитена

- увеличение межремонтных интервалов на 20–60% по сравнению с подвижным составом на обычных подрезиненных колесах, что было подтверждено в процессе проводившихся сравнительных испытаний на городских и региональных линиях. Правда, эти данные не являются абсолютными, так как они получены для верхнего строения пути определенной конструкции, с учетом конкретных характеристик трасс и особенностей графиков движения;

- снижение влияния на динамику движения отклонений геометрии пути от нормы благодаря уменьшенной величине сил в зоне контакта колеса с рельсом и повышенной упругости в поперечном направлении, а также возможность отказа в некоторых случаях от укладки дополнительных переходных кривых;

- уменьшение вертикальных механических нагрузок, вызываемых некруглостью колес и ползунами. Кроме того, при жестких колесах в диапазоне высокой скорости движения могут заметно возрасти динамические колесные нагрузки, что связано с процессом образования некруглости (полигонизацией) поверхности катания колес. В зависимости от радиальной жесткости у колес с резиновой амортизацией эти эффекты в значительной мере уменьшаются. К тому же полигонизация, вызываемая колебаниями колесной нагрузки, проявляется на колесах с резиновой амортизацией после значительно большего пробега, чем у жестких колес;

- улучшение экономических показателей благодаря увеличению межремонтного пробега, а также меньшим затратам на установку нового бандажа, поскольку при этом требуется только замена изношенного бандажа и, возможно, резиновых амортизаторов. Прочие дорогостоящие работы по формированию колесных пар, которые предусматривают наличие соответствующего стационарного оборудования в условиях депо (например,

прессов), могут не потребоваться. В связи с этим повышенные затраты на закупку колес с резиновыми элементами амортизируются в течение короткого периода эксплуатации.

Колеса с резиновой амортизацией наряду с очевидными достоинствами имеют и ряд недостатков:

- наличие резиновых элементов ограничивает осевую нагрузку и грузоподъемность подвижного состава. При малых диаметрах колес, высоких колесных нагрузках и желательном большом сроке службы резиновых амортизаторов потребуются упругие элементы большой ширины, в том числе в конструкции с одним резиновым кольцом. Большая величина резиновых элементов влечет за собой увеличение ширины бандажа. Он может оказаться шире, чем требуемая ширина колесного профиля. Это необходимо учитывать при определении зазоров между колесом и элементами рамы тележки;

- общая высота сечения, включающая в себя бандаж, резиновые амортизаторы и колесный центр, больше, чем у жесткого колеса. В колесах с двумя упругими элементами эта разница особенно велика. Это может вызвать значительные трудности при разработке вагонов с пониженным уровнем пола, ходовой частью со свободно вращающимися на оси колесами и тяговыми двигателями, смонтированными на ступицах колес;

- амортизирующие кольца из натурального или этиленпропиленового каучука не должны подвергаться длительному воздействию температур выше 80–130 °С. В связи с этим при выборе типа служебного тормоза следует помнить, что колеса с такими упругими элементами непригодны для оснащения колодочными тормозами, а также дисковыми, если тормозные диски установлены на ступицах колес;

- в колесе с резиновой амортизацией больше деталей, чем в жестком, в связи с чем возрастает чис-

ло единиц хранения на складе запасных частей. Этот фактор также следует учитывать при выборе конструкции, хотя влияние его на общий результат незначительно по сравнению с весомыми эксплуатационными преимуществами такого колеса.

Колеса с одним резиновым кольцом, разработанные в Бохуме

Преимущества колеса типа Во 54, разработанного в Бохуме, рассмотрены ранее, а необходимость в применении запрессовочного приспособления и ограничения при демонтаже следует отнести к его недостаткам. В зависимости от конструкции колеса демонтаж можно выполнять и путем выпрессовки резиновых амортизирующих элементов. Тем не менее разборку обычно ведут путем снятия бандажа. Это нельзя считать принципиальным недостатком, поскольку такой демонтаж требуется только после того, как износ бандажа достигнет предельно допустимой величины.

Относительная аксиальная упругость колеса с резиновым амортизатором может привести к трудностям при освидетельствовании в соответствии с Правилами строительства и технической эксплуатации железных дорог Германии (ЕВО), в частности при оценке поперечных размеров. Согласно этим нормам у колес с диаметром круга катания менее 840 мм расстояние между внутренними сторонами колес одной оси при нагрузке должно составлять 1359–1363 мм. Этот небольшой допуск уже может быть целиком исчерпан в процессе формирования колесной пары или в результате упругого прогиба ее оси. Тем не менее накопленный опыт эксплуатации таких колес в различных видах рельсового транспорта показывает, что поперечная упругость не приводит к возникновению недопустимых сил

взаимодействия колеса с рельсом, а при значительных нарушениях в положении пути предельный порог значительно повышается по сравнению с критическими состояниями, характерными для колес, жестких в поперечном направлении. К тому же поперечные смещения можно ограничить посредством дополнительно устанавливаемых жестких упоров между колесным центром и бандажом (рис. 4, слева).

В 1980-е годы снова был поставлен вопрос о широком внедрении колес с резиновыми амортизаторами. В тот период это требование действительно имело смысл применительно к концепции подвижного состава с внутренним расположением букс. С использованием классического колеса Во 54 решить данную проблему было невозможно. К этому моменту существовавшая ранее концепция на основе колесных пневмошин, аналогичных автомобильным, была настолько усовершенствована, что замену шин можно было выполнять практически так же, как на автомобилях. Такое решение (рис. 4, справа) позволяло значительно уменьшить габариты и могло быть использовано для современного подвижного состава с пониженным уровнем пола и тяговыми двигателями, устанавливаемыми на ступицах колес. Подобная конструкция колеса дает возможность сократить до минимума потребность вагоноремонтных предприятий в специальном оборудовании и дополнительных складских



Рис. 4. Современные конструкции колес с резиновыми амортизаторами, обеспечивающие простую и быструю замену бандажа

площадях. Компании, эксплуатирующие подвижной состав, могли бы приобретать готовые к монтажу колесные блоки, а изношенные бандажи, резиновые элементы и колесные центры восстанавливать в централизованном порядке. Возможно также отбраковка любого из перечисленных компонентов в случае невозможности их восстановления.

На основе опыта эксплуатации колеса типа Vo 54 было разработано новое колесо с резиновой амортизацией типа Vo 84, которое в 1984 г. появилось на рынке. В нем амортизирующее кольцо также выполнено из отдельных резиновых элементов, устанавливаемых между колесным центром и бандажом. Резиновые элементы, так же как и в предыдущей модификации, запрессовываются с предварительным напряжением 30%. Предварительное напряжение создается между двумя движущимися навстречу друг другу конусами на диске колеса и примыкающим к ним запорным кольцом бандажа. Это кольцо в процессе монтажа дополнительно запрессовывается при помощи переносного приспособления на коническое посадочное место колесного диска. Такое соединение надежно удерживает все детали колеса. Болты, которыми запорное кольцо крепится к диску, служат исключительно для дополнительной страховки. Благодаря такой конструкции в нормальных эксплуатационных условиях на болты не воздействует циклическая нагрузка.

В отличие от модели Vo 54 данное колесо обладает повышенной аксиальной жесткостью, что позволяет реализовать поперечные размеры колесной пары в пределах, предусмотренных нормами ЕВО, правда, за счет некоторого увеличения радиальной жесткости. Колеса этого типа быстро получили широкое распространение, в том числе на высокоскоростном подвижном составе. Здесь в полной мере проявились все их ранее рассмотренные преимущества перед цельнокатанными коле-

сами в отношении распространения шума, увеличения пробега и пр.

После крушения высокоскоростного поезда семейства ICE в районе Эшеде (Германия), произошедшего по причине разрушения колесного бандажа, в настоящее время колеса этого типа применяются только на пригородном подвижном составе. Излом бандажа произошел из-за превышения нагрузки, допустимой для данной детали. При равных предельных нагрузках и одинаковых условиях эксплуатации обе конструкции колес (жестких и подрезиненных) обладают одинаковым уровнем надежности. За прошедшие два десятилетия конструкция колес с резиновыми амортизаторами неоднократно совершенствовалась для того, чтобы колеса обоих типов могли соответствовать постоянно изменяющимся требованиям, предъявляемым конструкторами подвижного состава.

Если в начале 1960-х годов вагоны трамвая допускали осевую нагрузку 6 т при диаметре колес 730 мм, то сегодня востребованы колеса диаметром 560 мм для осевой нагрузки 13 т. Помимо этого, ходовая часть вагонов с пониженным уровнем пола должна иметь меньший габарит при увеличенной нагрузке на резиновые амортизаторы ввиду их нагрева от работающих тяговых двигателей и/или торможения.

Экологические требования обуславливают применение дополнительных звукоизолирующих элементов для устранения шумов при движении в кривых. Нередко это достигается за счет экономии места,



Рис. 5. Различные варианты исполнения колеса с одним амортизирующим элементом и съемным кольцом колесного центра

отведенного для размещения резиновых амортизирующих колец. Для соблюдения всех требований разработаны колеса, получившие обозначения Vo 2000 и Vo 06 (рис. 5).

Колеса с двумя резиновыми кольцами (Бохум)

Колеса всех типов с резиновой амортизацией, в которых создаваемая колесной нагрузкой сила сжатия воздействует на резиновые элементы, обладают относительно высокой радиальной упругой жесткостью, лежащей в диапазоне 50–250 кН/мм. Разработанные еще в первой половине XIX в. колеса с двумя и большим числом амортизирующих колец, на которые в результате вертикальной колесной нагрузки воздействовали и силы сдвига, имели другую упругую характеристику, отличающуюся от характеристики колес с одним амортизирующим кольцом. При двух амортизирующих кольцах могут быть реализованы значительно большие упругие перемещения, хотя резиновые элементы сами по себе и обладают достаточной жесткостью. Ввиду того что нагрузка на резиновые кольца возрастает под действием тепловых потерь при амортизации, эти упругие элементы должны иметь увеличенные размеры.

В 1990-е годы в связи с увеличением потребностей в поставках подвижного состава с пониженным уровнем пола, где из-за ограниченного пространства приходилось отказываться от первичного рессорного подвешивания, повысился спрос на колеса с резиновой амортизацией. Используя имеющийся на сегодня потенциал технического развития, разработчики создали колеса с повышенной амортизацией.

Прежние предельные условия были пересмотрены и сориентированы на новые технические требования, предъявляемые к подвижному составу с пониженным уровнем пола. Последние предусматривают

для трамвая осевую нагрузку 10 т и диаметр новых колес 600 мм. Конструкция нового колеса типа Vo 01, отвечающего указанным условиям, показана на рис. 6 справа.

Резиновая амортизация в таком колесе обеспечивается двумя идущими по окружности и предварительно запрессованными резиновыми кольцами с завулканизированными в них стальными пластинами, которые контактируют с центральным фланцем бандажа, корпусом колесного центра и специальным фиксирующим кольцом. Последнее соединено с корпусом колесного центра болтами с фиксированной затяжкой, которая в поперечном направлении ограничена дистанционными втулками. Для их пропуска предусмотрены отверстия в резиновых элементах и стальных фланцах. Такое конструктивное решение позволяет не нагружать болты изгибающим моментом при взаимодействии колеса с рельсом.

Позднее возникла потребность в увеличении осевой нагрузки до 13 т при сохранении диаметра круга катания колес. Чтобы срок службы резиновой амортизации соответствовал сроку службы колесных бандажей, пришлось увеличить размеры резиновых элементов по сравнению с примененными в колесах Vo 01. Для решения поставленной задачи пришлось пойти на модификацию резиновых элементов. На основе рассмотрения показателей усталостной прочности удалось установить, что обеспечить необходимый дополнительный объем резинового элемента можно только при отказе от отверстий в резине под элементы крепления и дополнительных изменений в конструкции. В результате новой разработки было создано колесо типа LoRa (см. рис. 6, слева) с двумя резиновыми кольцами, отличительной особенностью которого является связь между колесным центром и фиксирующим фланцем, выполненная по аналогии с колесами Vo 84 и Vo 06, имеющими по одному амортизирующему кольцу.

В новом колесе фиксация удерживающего фланца осуществляется напрямую через коническое прессовое соединение специальной формы с корпусом колесного центра.

Радиальная упругая жесткость колес типа Vo 01 и LoRa лежит в пределах от 15 до 30 кН/мм. Важной особенностью их является обусловленная новой конструкцией улучшенная способность гашения частот собственных колебаний колеса, что подтверждено проведенными ходовыми испытаниями. Это позволяет внести важный вклад в снижение уровня шума и отказаться от дополнительных мер по шумоподавлению, например от установки колесных абсорберов. В то время как у колеса с одним амортизирующим кольцом бандаж, опирающийся на резиновые элементы, при особо неблагоприятных условиях возбуждения колебаний может за счет собственной формы колебаться в поперечном направлении со значительной для звукового диапазона амплитудой, у обоих колес с усиленной амортизацией обеспечивается дополнительная шумоизоляция при прохождении кривых и уменьшается уровень скрежета за счет особого характера собственных колебаний. Дополнительно остается возможность принятия мер для суммарного снижения уровня шума путем установки колесных абсорберов или демпфирующих колец.

Заключение и перспективы

На сегодняшний день уже невозможно представить городской рельсовый подвижной состав без колес с резиновой амортизацией. Эти колеса позволяют в значительной мере снизить шум и вибрацию, увеличить сроки эксплуатации по сравнению с жесткими колесами. В связи с широким распространением подвижного состава с пониженным уровнем пола требования к колесам постоянно повышались. При этом свободное пространство для их размещения

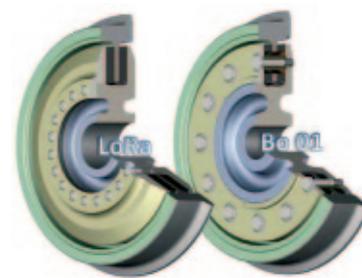


Рис. 6. Колеса типов Vo 01 и LoRa с высокой степенью амортизации

неизменно сокращалось, а колесная нагрузка возрастала. Для удовлетворения требований различного характера реализованы соответствующие типы колес, однако еще на стадии разработки нового подвижного состава необходимо как можно раньше определяться с выбором конструкции колес, чтобы использовать все имеющиеся потенциалы.

Применение «комплектного» бандажа, т.е. предварительно смонтированного вместе с внутренним ободом, позволяет производить его замену практически так же, как меняют автомобильную шину, не касаясь зоны, где расположены резиновые элементы. Такой подход представляет особый интерес с точки зрения затрат жизненного цикла (LCC). Сборку новых бандажей, ремонт бывших в употреблении деталей, а также восстановление и возвращение в оборот изношенных могут взять на себя централизованные ремонтные службы и даже заводы-изготовители.

Исследуется целесообразность применения колес с резиновыми амортизирующими кольцами для снижения уровня шума и вибраций на подвижном составе, к которому требования такого рода ранее не предъявлялись. Это позволит повысить экологичность и экономическую эффективность железных дорог.

F. Murawa. Eisenbahningenieur, 2010, № 2, S. 36–41; материалы компании Bochumer Verein Verkehrstechnik (www.bochumer-verein.de) и Bonatrans (www.bonatrans.cz).