

Колесные пары

для высокоскоростных поездов

Для работы в высокоскоростных поездах колесные пары должны обладать способностью выдерживать без возникновения дефектов миллионы циклов нагружения. За 25 лет эксплуатации высокоскоростных поездов во Франции и Германии накоплен значительный опыт в конструировании, изготовлении и техническом обслуживании колесных пар, эволюция которых развивалась в направлении улучшения геометрических параметров и повышения качества используемых материалов.

Юбилей высокоскоростного движения на железных дорогах Франции

Высокоскоростное движение уже в течение 25 лет является для Франции синонимом технического успеха, достигнутого в 1980-х годах, когда стало ясно, что будущее междугородных пассажирских сообщений связано прежде всего с железнодорожным транспортом, экономического и коммерческого успеха, а также признания со стороны общества, в том числе в экологическом аспекте.

С технической точки зрения скорость движения поездов на железных дорогах Франции повышалась поэтапно: в 1970-х годах пассажир-

ские поезда Corail на локомотивной тяге развивали в регулярной эксплуатации скорость до 200 км/ч, на первом этапе развития высокоскоростного движения поезда TGV ходили со скоростью 280 км/ч, в настоящее время максимальная скорость движения поездов TGV составляет 300 км/ч, в самом ближайшем будущем достигнет 320 км/ч, а в перспективе — 360 км/ч.

Начиная с 1980-х годов совершенствование колесных пар, являющихся критическим элементом конструкции подвижного состава, осуществлялось по следующим четырем основным направлениям:

- разработка новой конструктивной концепции с оптимизацией формы колес в целях повышения сопротивляемости механическим нагрузкам и создания условий для оптимизации тормозной системы. Так, использование колесных дисков с отверстиями совместно с прифланцованными тормозными дисками позволило повысить усталостную прочность колес;
- повышение безопасности за счет улучшения конструкции колесных пар в целях обеспечения удобства осмотра, контроля, обнаружения дефектов и наблюдения за их развитием;
- улучшение экологических характеристик за счет снижения

уровня шума при движении поездов;

- удлинение общего жизненного цикла колесных пар с очевидной целью снижения общих затрат на приобретение, эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт.

Конструктивная концепция и оптимизация колесных пар

В настоящее время действуют общеевропейские нормы, определяющие порядок проектирования колес (EN 13979-1) и колесных пар в сборе (EN 13103 и EN 13104) и относящиеся не только к изготовлению новых колесных пар (рис. 1), но и к их приемке.

Учет этих требований конкретизируется в установленной процедуре сертификации данной продукции, при которой производится ее аттестация (в том числе и по технико-эксплуатационной совместимости в целях обеспечения возможности обращения подвижного состава по железным дорогам разных стран Европы).

Колесные пары для высокоскоростных поездов

Необходимо подчеркнуть, что процесс проектирования, подготовки производства и изготовления колесных пар для высокоскоростных поездов имеет следующие особенности:

- должна быть обеспечена однородность металлургических и механических характеристик, необходимая для получения изделий как можно более осесимметричных как по материалу, так и по геометрическим параметрам;
- характеристики легирующих присадок в используемый металл должны обеспечивать отсутствие дефектов на поверхности катания колес.

Именно этими критериями руководствуется компания Valdunes (Франция), один из крупнейших в Европе поставщиков колесных пар

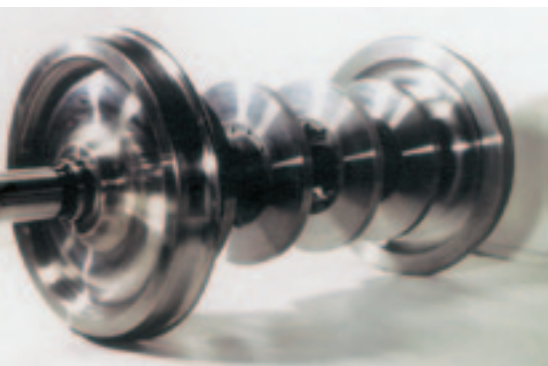


Рис. 1. Колесная пара поддерживающей тележки высокоскоростного электропоезда TGV в сборе (с тормозными дисками)

для железнодорожного подвижного состава разных типов.

Выплавка стали

Колесная сталь получается путем переплавки предварительно отобранного металлолома, что позволяет контролировать содержание неокисляемых остатков таких элементов, как хром и молибден. Затем жидкий металл, перед тем как подвергнуться процессу очистки в подогреваемом ковше, раскисляется за счет добавления алюминия.

Переплавка позволяет получить жидкий металл с окислением большинства химических элементов, а очистка оставляет нужную долю остаточных химических элементов, что позволяет полученной стали по результатам анализа соответствовать марке ER7 (C50).

Химически оптимизированная сталь затем подвергается обязательному циклу дегазации в вакууме для ограничения содержания таких остаточных газов, как водород. Требуется, чтобы содержание водорода было ниже двух частей на миллион, так как этот очень легкий газ может вызывать образование пустот в металле, которые повышают вероятность возникновения трещин.

Последующая обработка кальцием позволяет рассредоточить неметаллические включения с целью исключения образования скоплений множества мелких частиц оксидов (главным образом, Al_2O_3), столь же вредных, как отдельные более крупные частицы.

Отверждение металла производится в ходе процесса непрерывного литья на вращающейся дорожке диаметром 325 мм. На этой фазе металл затвердевает в осесимметричном виде на аналитическом уровне. Действительно, вращение позволяет избежать заметной и асимметричной ликвации по углероду и сере. При непрерывном литье происходит также устранение последних нежелательных включений за счет их перемещения в центральный конус и последующей обрез-

ки только крайних частей слитка — головы и пяты, в которых, как правило, концентрируются дефекты и которые следует отрезать с целью удаления усадочных раковин.

Таким образом, сталелитейный процесс является существенным этапом в получении аналитически однородного продукта, содержащего как можно меньшее количество экзогенных частиц, которые могут или непосредственно способствовать появлению трещин (например, газы типа водорода), или быть фактором их образования при высокочастотных нагрузках, свойственных высокоскоростному движению.

Обработка заготовок

Колесные заготовки куются на прессе с усилием 6000 т при температуре 1280 °С из полученных методом непрерывного литья отливок массой около 530 кг. Штамповка производится с коэффициентом обжатия металла, равным 7. Она выполняется перед прокаткой диска и его гибкой на прессе с усилием 5000 т.

После гибки, которая завершается при температуре 850 °С, производится медленное охлаждение, обеспечивающее однородность металлургической структуры перед закалкой и окончательную минимизацию содержания в металле растворимых газов.

Затем колеса подвергаются термической обработке путем аустенизации в течение 3 ч при температуре 880 °С и последующей закалки при помощи распыления воды на поверхность катания в зону контакта колеса и рельса. Термообработка позволяет получить прочностные характеристики в пределах от 820 до 940 Н/мм², как это и требуется для стали марки ER7T. Различные режимы закалки обода и диска колеса позволяют создать в ободе остаточные напряжения сжатия, которые предотвращают развитие дефектов на поверхности катания. Термическая обработка диска колеса заключается только лишь

в нормализации (аустенизация и медленное охлаждение), что позволяет сохранить хорошие характеристики по вязкости.

Колеса подвергаются контролю путем испытаний разрушающими методами, а также проверки однородности металла и измерений твердости. Максимальный разброс значений твердости в партии колес не должен превышать 30 ед. по Бригеллю.

Окончательная форма колеса получается путем комплексной механической обработки на вертикальных токарных станках большой производительности с чистой обработкой поверхности катания керамическими резцами. После этого масса заготовки колеса уменьшается с 497 до 353 кг за счет снятия слоя металла припуска толщиной от 5 до 6 мм, образовавшегося при ковке.

Выполняемая после этого балансировка позволяет уравновесить колесо перед сборкой. Допустимый дисбаланс колеса ограничен 25 г·м.

Операции механической обработки заканчиваются неразрушающим контролем обода в вертикальной и горизонтальной плоскости, а также в мертвых зонах методом ультразвуковой дефектоскопии, что позволяет выявить дефекты, эквивалентные отверстию диаметром 1 мм в металлической пластине. Для других применений стандартными являются дефекты, эквивалентные отверстиям диаметром 2 или 3 мм.

Производственный процесс рассчитан в соответствии с условиями эксплуатации на срок службы колес, достигающий (по пробегу) 2,5 млн. км (рекордный показатель) и в среднем установленный на уровне 1,5–2 млн. км.

Всего в разных странах мира высокоскоростные поезда (учтены французские электропоезда TGV, испанские AVE, германские ICE, южнокорейские KTX, американские Acela, электропоезда международных сообщений Thalys и Eurostar)

Характеристики колесной стали

Параметр	Поврежденное колесо		Отбракованное колесо		Годное колесо	
	Осевое	Радиальное	Осевое	Радиальное	Осевое	Радиальное
Направление измерений						
Общее число включений размером более 200 мкм	–	539	94	154	32	19
Число включений на 1 дм ³	–	91	9	24	2,5	3
Средний размер дефекта, мм	–	5,30	0,36	1,10	0,11	0,15

совершили на середину 2006 г. суммарный пробег в 150 млрд. км.

Оси колесных пар изготавливаются из нормализованной углеродистой стали марки EA1N (32 Mn4). Окончательная форма осей придается механической обработкой прокатных заготовок с высверливанием центрального сквозного отверстия диаметром 80 мм, что, например, позволяет получить на каждой оси колесных пар поездов Eurostar и Thalys экономию массы порядка 80 кг.

Оптимизация параметров безопасности

Нежелательные включения

Осевые нагрузки высокоскоростных поездов равны порядка 17 т. В течение срока службы колесные пары подвергаются примерно 50×10^7 циклам нагружения интенсивными динамическими воздействиями. Это обуславливает большую вероятность возникновения дефектов контактно-усталостного происхождения, которые еще более ухудшают условия работы колес.

Высокие нагрузки могут привести к зарождению дефекта под поверхностью катания в месте присутствия неэкзогенных включений типа оксидов. Включения, естественно, более твердые, чем металлическая матрица, способствуют началу образования трещин на глубине от 15 до 20 мм. Развитие трещин идет по горизонтали, что может привести к отколу участков обода, длина которых может достигать от 200 до 300 мм, с риском схода с рельсов.

Решение заключается в снижении плотности посторонних вклю-

чений в ходе сталелитейного процесса и минимизации риска их появления в зонах циклического нагружения.

Исследования с использованием сфокусированного ультразвукового излучения позволяют оценить качество металла колеса на макроуровне. Соответствующие показатели, полученные в ходе выполнения компанией Valdunes исследования для трех колес: колеса с разрушившимся из-за дефекта ободом, колеса, отбракованного при ультразвуковой дефектоскопии по наличию дефекта, эквивалентного отверстию диаметром 2 мм, и колеса, признанного годным для высокоскоростного движения, — приведены в таблице.

На основе такого подхода, аналогичного используемому при изготовлении подшипников качения, выработаны критерии, с тем чтобы следить за качеством металла и, соответственно, осуществлять корректировку сталелитейного процесса.

Формирование

Формирование колесных пар производится холодной напрессовкой колес на ось с натягом, согласно нормам EN 13260 равным примерно 0,3 мм. Большинство осей не просверливается (за исключением осей колесных пар поездов Eurostar и Thalys). Качество соединения в эксплуатации визуально контролироваться не может. В то же время настоятельно необходимо выявление признаков наличия трещин, которые начинаются под ступицей колеса и могут получить там дальнейшее развитие, но остаются невидимыми при выполнении опера-

ций по техническому осмотру. При напрессовке колес на ось наблюдается явление фреттинг-коррозии (коррозии при трении), которая может инициировать возникновение трещин по краям центрального отверстия колес. Фреттинг-коррозия вызывает микродеформации на поверхностях интерфейса ось — колеса, связанные с прогибом оси под нагрузкой. Исследования этого явления путем расчетов и лабораторных испытаний позволили лучше понять этот феномен и оценить надежность соединения колес с осью.

Овальность колес

Овальность колес является довольно распространенным явлением. При этом поверхность катания колеса не представляет собой идеальной окружности и может на длине от 100 до 150 мм «проседать» на 0,4–0,5 мм. Это особенно опасно для высокоскоростного движения, так как этот дефект обуславливает вибрации колесной пары и, следовательно, увеличение нагрузок на подшипники.

Овальность имеет два основных нежелательных последствия:

- нарушение нормального режима работы подшипников, что может привести к их перегреву с последующим его обнаружением детекторами нагрева букс;
- увеличение динамических нагрузок, которое может привести к повышению чувствительности к неметаллическим включениям.

Исследования, проведенные SNCF совместно с компанией CEA, позволили лучше понять причины появления дефектов на некруглых поверхностях катания, а также растворения цементита в результате соударений в точках контакта.

Оптимизация тормозов

В настоящее время на средней части оси колесных пар прицепных вагонов поездов TGV монтируются четыре стальных тормозных диска. При остановке со скорости 300 км/ч каждая колесная пара при чисто механическом тор-

мождении должна поглощать 6 МДж энергии. При тормозном пути поезда TGV, равном 3300 м, эта значительная энергия должна поглощаться за 80 с.

Конструктивное решение тормозной системы в виде двух тормозных дисков, монтируемых на дисках колес с обеих сторон, радикально меняет конфигурацию системы, а также конструкцию колеса. Диск колеса является самой напряженной по прочности зоной, а высверленные в нем отверстия для крепления тормозных дисков еще более повышают уровень напряжений. Более того, в местах соединения тормозных дисков с диском колеса температура может достигать 160 °С, создавая дополнительные напряжения растяжения в диске колеса.

Поэтому форма и размеры диска колеса определяются по критериям многоосной усталостной прочности, полученным в результате расчетов и усталостных испытаний. Сложная сборка создает в колесе чувствительные зоны, трудно контролируемые в эксплуатации без демонтажа, поэтому необходимо найти пути оценки поведения узла соединения за очень большое число циклов нагружения. Соответствующие исследования были выполнены специалистами Valdunes.

Шумовое загрязнение окружающей среды

Проблема шума

Шум от движения поездов на железных дорогах подразделяется на две категории:

«визжащий» шум, возникающий при движении подвижного состава в кривых. Этот шум характерен в основном для подвижного состава городского рельсового транспорта;

шум качения, возникающий в зоне контакта колеса и рельса при взаимодействии их поверхностей. Колесо и рельс, каждый сам по себе, вносят свой существенный вклад

на уровень излучаемого шума. Проблема снижения этого уровня является первостепенной для высокоскоростных поездов TGV.

Возбуждение вибрации

В случае шума от качения колеса по рельсу роль основного возбудителя вибраций играют наличие и форма неровностей поверхности катания (спектр неровностей), вызывающих смещение колеса относительно рельса.

Когда длина волны неровности на поверхности катания становится по величине равной или меньшей самого большого эллиптического пятна контакта, проявляется эффект фильтрации. Это явление в сочетании с влиянием скорости движения поезда является причиной того, что шум качения характеризуется частотным диапазоном между 200 и 2000 Гц.

Амплитуда взаимных смещений в системе колесо — рельс в точке контакта зависит в основном от интенсивности и размеров нарушений геометрических параметров колеса и рельса. Показатель восприимчивости (отношение величины ускорения, вызываемого силой, к величине этой силы) рельса и колеса определяет соответственно возбуждение вибрации колеса или рельса в функции скорости.

Излучение шума

Коэффициент звукового излучения вибрирующей поверхности S представляет собой величину, которая определяется отношением мощности излучения W к квадрату средней скорости $V^2(f)$, измеренной на этой поверхности.

Для случая шума качения наиболее характерными видами вибраций являются радиальные, возникающие при радиальном смещении обода колеса, а также осевые.

Для колес поездов TGV диаметром 920 мм при скорости 300 км/ч частотная зона наиболее «шумных» вибраций находится выше 1390 Гц.

В этой связи выявилась необходимость оценить акустическую

нагрузку на окружающую среду от подвижного состава и пути. Установлено, что при движении с относительно низкой (менее 150 км/ч) скоростью в излучении шума системой колесо — рельс доминирует путь. От указанной скорости и до предельных 300–350 км/ч большой вклад в излучение шума вносят колеса. При еще более высокой скорости движения преобладающим становится аэродинамический шум от состава поезда.

Ограничение шума

В конце 1990-х годов SNCF провело ряд исследований с целью изучения причин возникновения шума качения и проверки технических решений для снижения его уровня.

Контроль возбуждения

Неровности на поверхности катания колес в большой степени зависят от принятых режимов торможения, и в частности от параметров взаимодействия тормозных колодок с колесами, определяемых силой прижатия, материалом колодок и т. п. Однако на высокоскоростных поездах колодочные тормоза не применяются вообще или применяются в исключительных случаях, поэтому трудно снизить уровень шума за счет применения, например, композиционных колодок. Вместе с тем следует отметить, что применение чугунных тормозных накладок в дисковых тормозах поездов TGV Sud-est позволило снизить общий уровень шума на 10 дБ (А). Чугунные же тормозные колодки сильно ухудшают состояние поверхности катания колес, и от их применения отказались.

Контроль излучения

Оптимизация формы цельнокатаных колес. Оптимизация формы колес путем сведения центров масс обода и диска в одной плоскости, совпадающей с точкой контакта колеса и рельса, позволяет разединить радиальное возбуждение



Рис. 2. Колесо поезда TGV с оптимизированным ободом

и осевые реакции. Испытания при скорости 300 км/ч подтвердили целесообразность такого решения: при хорошем состоянии пути стало возможным снизить уровень шума на 4,5 дБ (А). Однако большой выигрыш по уровню шума у цельнокатаных колес достигается за счет увеличения их массы приблизительно на 15%.

Последние исследования на колесах высокоскоростных поездов TGV показали, что за счет оптимизации формы обода можно снизить на 2,7 дБ (А) уровень шума от колеса и еще на 1,6 дБ (А) от системы колесо — рельс. Этот вариант оптимизации был реализован без увеличения массы колеса (рис. 2).



Рис. 3. Колесо со звуковыми амортизаторами

Динамическая амортизация.

Из всех технических решений, дошедших до нас с начала прошлого века, амортизация конструкций была наиболее разработанной. Очевидно, что при рассмотрении проблемы амортизации таких вибрирующих поверхностей, как диски колес, на ум приходит решение типа системы масса — амортизатор.

Зависимость между массой и параметрами оптимальной для нее системы амортизации можно довольно просто определить аналитически — модальным анализом результатов экспериментов или расчетами, позволяющими оценить, что именно необходимо амортизировать. В случае колес технические трудности представляют крепление амортизирующих элементов, в месте которого в колесе возникают большие термические и механические напряжения, а также ограниченность пространства.

Наиболее новаторское решение появилось в 1996 г. Его эффективность была подтверждена испытаниями, в ходе которых колеса с алюминиевым центром, оснащенным динамическими амортизаторами, показали снижение уровня шума на 10 дБ (А). Однако такая технология применима только к бандажным колесам, от использования которых на высокоскоростном подвижном составе отказались из-за риска схода бандажа с колесного центра.

Контроль распространения

Последним из рассматриваемых направлений решения указанной экологической проблемы является создание препятствий для распространения шума от колеса. В данном случае предложено придать колесу обтекаемую форму за счет закрытия диска двумя противозумными приспособлениями (так называемыми звуковыми амортизаторами, рис. 3). Такое решение технически эквивалентно шумозащитным стенкам-экранам, устанавливаемым вдоль пути, но имеет

преимущество с эстетической точки зрения.

Использование звуковых амортизаторов позволяет снизить уровень шума на 6–7 дБ (А), как было показано в ходе испытаний на поезде TGV. Такое решение, однако, неприемлемо для подвижного состава с колодочными тормозами из-за отрицательного воздействия нагрева колеса на амортизаторы и их крепление. К тому же амортизаторы необходимо демонтировать при техническом осмотре и обслуживании. Кроме того, не определен срок службы амортизаторов и крепежных элементов даже в отсутствие напряжений при торможении, а также существует риск их потери при движении с высокой скоростью.

В общем случае внедрение таких противозумных систем как на пути, так и на подвижном составе тормозится экономическими соображениями.

Заключение

Реализация концепции высокоскоростного (порядка 300 км/ч) движения поездов является нелегким делом. Опыт Франции показывает, что она должна осуществляться поэтапно, по мере накопления знаний и опыта. Это относится и к совершенствованию ходовой части подвижного состава.

Технологии, разработанные SNCF, компаниями Alstom и Val dunes, определяют высокий уровень надежности высокоскоростных поездов и их конструктивных элементов. Сроки их службы достигают рекордных значений. На следующем этапе, когда речь пойдет о движении со скоростью до 360 км/ч в регулярной эксплуатации и с соответствующим уменьшением продолжительности поездок, главным направлением развития этих технологий станет обеспечение безопасности движения.