

Разработка тележки грузового вагона для Российских железных дорог

С 2001 г. ведется совместная работа Высшей школы Аугсбурга (ФНА) и Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). В рамках международного проекта студенты и профессора совместно исследуют принципиальную возможность реализации для Российских железных дорог тележки грузового вагона, выполненной в виде сварной конструкции. В Москве и Аугсбурге студенты представили специалистам результаты конструирования, выбора материала и расчетов по методу конечных элементов.

МИИТ — это самый известный и крупный транспортный вуз в России, специализирующийся на вопросах деятельности железных дорог с акцентом на подвижной состав и инфраструктуру. Железнодорожный транспорт имеет особое значение для России. Общая протяженность сети железных дорог составляет около 87 тыс. км. К 2010 г. Российские железные дороги (РЖД) намерены увеличить грузовые перевозки до 2 млрд. ткм. Концепция модернизации железнодорожного подвижного состава предусматривает, помимо прочего, разработку новой тележки для грузовых вагонов. В настоящее время на дорогах эксплуатируются тележки с литыми боковинами и цельнолитой надрессорной балкой, разработанные более 50 лет назад. Их должны заменить новые тележки сварной конструкции, соответствующие западным стандартам.

Факультет машиностроения Высшей школы Аугсбурга обучает студентов в основном в области общего машиностроения. Специалисты этого факультета за многие годы накопили огромный опыт в таких дисциплинах, как программное обеспечение для решения технических задач (инженерная информатика), технология сварки, конструирование деталей машин и механизмов, что в целом составляет хорошую основу для совместной работы с МИИТом.

В рамках основной специализации группы студентов, составленные из будущих специалистов различного профиля, разрабатывают совместные проекты. При этом студенты самостоятельно осваивают методы управления проектом, сталкиваются с реальными проблемами и находят пути их преодоления. Основной задачей совместного с МИИТом проекта является модер-

низация тележки грузового вагона для Российских железных дорог.

Задачи совместного проекта МИИТа и ФНА, принципы конструирования грузовых тележек

До настоящего времени Российские железные дороги почти не имели никакого опыта эксплуатации сварных грузовых тележек. Новая тележка должна способствовать уменьшению износа рельсов. При ее разработке необходимо было учитывать преобладающие в России климатические условия. В первой части совместного проекта изложены постановочные вопросы расчета и конструирования сварной тележки грузового вагона. Конструкцию нужно было рассчитать на осевую нагрузку 23,5 т и скорость до 140 км/ч. Во второй части этого отчета приведены результаты расчета, выполненного методом конечных элементов (FEM), на основании которых можно сделать выводы о нагрузках сварной тележки. Исследование представляет собой принципиальное технико-экономическое обоснование.

Существует три принципа конструирования тележек для грузовых вагонов. Американская трехэлементная тележка состоит, как говорит само название, из трех конструктивных групп: боковых рам (боковин), колесных пар и поперечной надрессорной балки, которые подвижно связаны между собой (рисунок).

Если одно колесо «оседает», оно тянет за собой через буксу боковую

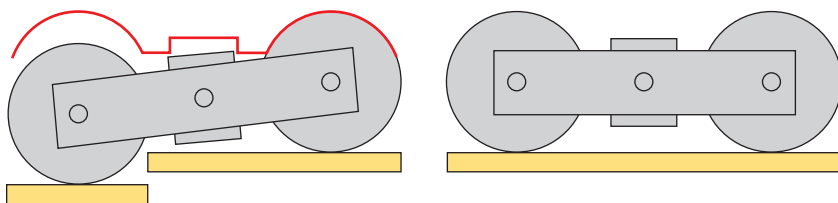


Схема и принцип действия трехэлементной тележки

раму. Эта рама скручивается относительно поперечной надрессорной балки и второй боковой рамы, положение и форма которой принимаются неизменными. За счет скручивания боковой рамы обеспечивается такое опирание всех колес, при котором силы реакции в точках контакта имеют одинаковую величину. Благодаря этому тележка остается в устойчивом положении. Так как оси установлены непосредственно в буксовые проемы рамы, подрессоривание с помощью винтовых или листовых пружин реализовано в первую очередь между боковинами и надрессорной балкой.

В России хорошо зарекомендовала себя в эксплуатации модернизированная трехэлементная тележка с литыми основными компонентами. В Центральной Европе с начала XX века преобладает жесткая конструкция рамы тележки, в которой штампованные из стального листа элементы соединены между собой с помощью клепки и сварки. При такой конструкции рама тележки через листовые рессоры или простые винтовые пружины опирается непосредственно на буксы. Боковые рамы жестко связаны с поперечной балкой, поэтому относительно жесткая на кручение рама, имеющая небольшое число крупных элементов, представляет собой квазиодноэлементную конструкцию.

Основное различие между этими тележками обусловлено разными принципами направляющего действия. В немецкой конструкции используются по две листовые рессоры с каждого конца рамы тележки, обеспечивающие направление колесных пар в продольном и поперечном направлениях. Французская тележка типа Y 25 с винтовыми пружинами имеет, как и трехэлементная, колесные пары с жесткой установкой, которые всегда расположены параллельно друг другу. С начала 1970-х годов конструкторы работают над улучшением ходовых качеств тележек, причем Рос-

Сравнение характеристик российской и немецкой сталей

Параметр	Сталь	
	09Г2С (Россия)	S355 J2G3 (Германия)
Содержание углерода, %	<0,12	0,2
Содержание кремния, %	0,5–0,6	0,6
Содержание марганца, %	1,3–1,5	1,7
Предел текучести R_e , МПа	295	355
Предел прочности на растяжение R_m , МПа	430	490–630
Ударная вязкость, Дж/м ²	>27 при –50 °С	>27 при –20 °С

сийские железные дороги стремятся к замене литых конструкций на сварные.

Концепция сварной тележки грузового вагона

Первый совместный проект тележки грузового вагона для Российских железных дорог разработан на основе концепции трехэлементной тележки.

Поперечная балка и две боковины соединяются между собой через винтовые пружины, поэтому они остаются подвижными по отношению друг к другу. Литые боковины и надрессорные балки были заменены на сварные конструкции коробчатого профиля из стального листа. Комбинированная винтовая рессора между продольной балкой и колесной парой воспринимает при определенном зазоре в подшипниковом узле дополнительные продольные и поперечные перемещения и обеспечивает даже при угловой разнице рельсов стабильное и плавное движение. Особо положительную роль это играет при движении в кривой.

Важной основой в производстве тележек является концепция сварки. В зависимости от марки стали должны быть определены: технология выполнения сварочных процессов, типы сварных швов, защитные газы, присадочные материалы, подготовка кромок листов под сварку и даже необходимый подогрев и последовательность сварки. Так как

многие сварочные швы изготавливаются автоматически, то необходимо, чтобы концепция сварки была максимально рассчитана на выполнение ее с помощью робота.

Материал

Российская конструкционная сталь 09Г2С является стандартом для Российских железных дорог. По составу и своим качествам она близка к немецкой стали S355 J2G3 (таблица).

Решающее значение при расчете имеет предел текучести. По сравнению с российской сталью марки 09Г2С предел текучести стали S355 J2G3, равный 355 МПа, выше на 60 МПа. Очевидно, что ударная вязкость российской стали 09Г2С при низких температурах лучше. Это соответствует требованию сохранения сварным соединением своих свойств в климатических условиях России в температурном диапазоне от –50 до +45 °С. Сталь S355 J2G3 в состоянии поставки в лучшем случае допускает температуру –30 °С. Кроме того, на обеспечение хорошей ударной вязкости при низких температурах также влияют свойства защитного газа, используемого при сварке, и качество сварочной проволоки.

Выбор защитного газа и сварочной проволоки

При выборе защитного газа и типа сварного шва решающими являются, во-первых, используе-

мый материал и, во-вторых, условия изготовления и эксплуатации. Защитный газ вступает в реакцию с определенными химическими элементами стали, образуя нитриды и окислы, что влияет на механико-технологические свойства сварного соединения. Чистый CO_2 способствует созданию в сварном соединении высоких концентраций кислорода. Если он останется в металле, то сварной шов (либо сварное соединение) будет содержать слишком много оксидных включений в структуре крупноугольчатого феррита. В связи с этим ударная вязкость сварного соединения снижается.

Газовая смесь с большим содержанием аргона способствует уменьшению содержания кислорода в наплавленном металле. Оксидных включений в нем становится меньше, и в структуре образуется мелкоугольчатый феррит. В сочетании с очень низким содержанием азота, обеспечиваемым качественной сварочной проволокой, достигается высокая ударная вязкость даже при низких температурах.

Сварочная проволока для низких температур дополнительно содержит никель (от 2,1 до 2,7%), а содержание марганца (0,8–1,4%) и кремния (0,4–0,8%) в ней несколько уменьшено по сравнению с проволокой, применяемой для сварки конструкций, работающих в нормальных температурных условиях.

Сварные швы и технология сварки

При изготовлении элементов рамы тележки используются различные типы сварочных швов. Основными конструктивными группами боковины являются нижний пояс, верхний пояс, два листа боковой стенки и лист основания пружинных рессор. Качество сварных швов должно соответствовать оценочной группе В. Кроме того, предельно составляется план по-

следовательности сварочных операций, причем сварка должна выполняться с помощью робота.

Первым шагом при изготовлении сварной боковины является соединение нижнего пояса и листов боковой стенки, каждая из которых имеет толщину 20 мм. За основу расчета режима сварки принимают двусторонний тавровый шов с катетом 10 мм. Сварку начинают с середины балки, а затем движутся вправо или влево пильгерным шагом. Такая технология имеет следующее преимущество: поперечная усадка равномерно распределяется по всей длине, а продольная усадка уменьшается. По завершении сварки зону стыкования обеих половинок швов выравнивают с помощью шлифования.

Следующим важным шагом является приварка основания для пружин рессорного подвешивания. На этом этапе продольная балка боковины оказывается уже настолько закрытой, что доступ к месту сварки остается только с одной стороны. В связи с этим сварка выполняется односторонним тавровым швом. Так как рессоры между боковиной и поперечной балкой опираются на лист основания, то в этой области возникают относительно высокие статические и динамические нагрузки. Для их восприятия нужно правильно подобрать параметры шва: наилучшую возможность предоставляет односторонний тавровый шов с разделкой кромок.

Для усиления конструкции боковины в нее включается также верхний пояс. При его изготовлении применяется сварка угловым швом. Толщина шва в этом случае зависит от толщины стенок и от степени взаимного перекрытия их сечений. Поскольку в этой области не ожидается никаких высоких динамических нагрузок, то возможностей такого простого шва достаточно для передачи действующих сил.

На этой последней операции заканчивается этап соединения ос-

новных деталей боковины. После этого необходимо монтировать дополнительные навесные узлы, например крепления для тормозных устройств или направляющие элементы для буксовых узлов. Эти детали привариваются большей частью вручную.

Расчет прочности

Чтобы проверить конструкцию тележки на прочность, нужно выполнить анализ методом конечных элементов (FEM), что сегодня является нормой. Применение этого метода обусловлено тем, что тележка представляет собой достаточно сложную конструкцию, а расчеты с помощью классических методов потребовали бы слишком больших затрат. Кроме того, подробный анализ конструкции всегда требует много времени, а в рамках проектно-конструкторской работы выполняется частично. По этой причине основное внимание уделяется построению модели, базирующейся на конечных элементах, и простоте расчетов. Основной целью этого расчета являются доказательства принципиальной возможности реализации данной конструкции и подготовка к более тщательному анализу. Построение модели ограничено боковиной тележки. В качестве расчетной статической нагрузки выбрана масса вагона.

Построение модели

Для рассматриваемого случая предусмотрено симметричное распределение нагрузки по боковине, которая также симметрична. Это позволяет сократить модель и рассматривать только половину боковой рамы. Далее целесообразно представить балку в виде плоскостей, объединенных в объемную конструкцию. Лучше всего этот метод подходит для тонкостенных моделей, к которым ближе всего сварная конструкция боковины. После

расчета трехмерной модели производится перерасчет на плоскую модель. Для этого используется специально разработанная компьютерная программа Nastran.

Расчет и результаты

Поскольку расчет выполняется только с учетом статической нагрузки, необходимо, кроме задания величины этой нагрузки, определить также граничные условия. Для рассмотрения берется только одна сила, действующая на одну половину боковины и представляющая собой реакцию буксы. Точка закрепления, препятствующая линейному смещению и повороту рассматриваемого элемента, находится в том месте, на которое опираются рессоры, воспринимающие усилие от наддресорной балки. Симметричная опора располагается в плоскости сечения, проходящей через ось симметрии боковины.

В основу расчета положены характеристики материала (модуль упругости и коэффициент Пуассона). Такие параметры, как предел текучести или относительное удлинение при разрыве, несущественны, так как расчет ориентирован только на определение возникающих напряжений.

Если тележка находится под нагрузкой, то возникающие удлинения и сдвиговые деформации вызывают перемещения угловых узлов относительно их первоначального положения. Нормальные и касательные напряжения вызывают деформации, которые больше по осям z и x , чем по оси y . В области круглого отверстия деформации достигают своего максимума.

В общем напряженное состояние детали можно оценить в том случае, если действие всех составляющих напряжений объединить в одно результирующее напряжение.

Поскольку масса вагона воспринимается только как статическая нагрузка, максимальное результирующее растягивающее напряжение в наиболее нагруженной области нижнего пояса достигает 150 МПа, что значительно ниже допустимого значения 295 МПа при использовании российской стали 09Г2С или 355 МПа при использовании немецкой стали S355 J2G3.

В зоне максимальных растягивающих напряжений меньше всего металла для восприятия нагрузок. В области сжатия максимальные напряжения равны 35 МПа. Это значение соответствует заданной величине.

Итоги и перспективы

В ходе рассмотренной проектно-конструкторской работы были выполнены конструирование и расчет тележки грузового вагона, адаптированной к условиям и потребностям российских грузовых перевозок. Изготовление такой тележки должно быть ориентировано на западноевропейские стандарты. В качестве базы для новой конструкции послужила находящаяся в эксплуатации в России трехэлементная тележка грузового вагона, получившая широкое распространение. Анализ ее конструкции с упором на узкие места позволил сформулировать технические требования. На основе выработанных требований спроектирована сварная конструкция и построена трехмерная САД-модель. При этом подробно разработаны только поперечная балка и боковины. На базе модели выполнен анализ нагрузок методом конечных элементов. Конструкция рассчитана на осевую нагрузку 23,5 т. Основное внимание уделили построению FE-модели и простому расчету. Основная задача состояла в том, чтобы показать принципиаль-

ную возможность реализации проекта и подготовиться к более глубокому анализу.

Для сконструированной тележки была разработана концепция сварки. Она включала выбор следующих позиций:

- метода сварки в среде защитного газа сварочной проволокой;
- типа сварного шва;
- последовательности выполнения швов.

Так как большая часть сварных швов выполняется автоматически, потребовалось разработать новую концепцию сварочного процесса с использованием робототехники.

Предложенная концепция тележки должна послужить основой для дальнейших исследований. Что касается FE-анализа, то он требует более подробного рассмотрения. Так как в рамках этого проекта не было возможности выполнить детальный анализ прочности и колебаний, то это, скорее всего, станет основной задачей последующих проектов. Так, необходимо будет, например, смоделировать различные расчетные варианты динамических нагрузок, чтобы можно было полностью охватить прочностные характеристики тележки. Кроме того, следует более подробно рассмотреть концепцию сварки. Чтобы сделать окончательные выводы, нужно найти и оценить все опасные зоны сварного шва. Это опять-таки можно реализовать с помощью расчета методом конечных элементов. Так, можно рассматривать ограниченные зоны по отдельности, чтобы на их основе сделать затем правильные выводы для окончательного расчета сварных швов.

По материалам компаний Bombardier Transportation, Kuka Schweissanlagen (Ауцбург), Siemens Transportation Systems, ELH Eisenbahnlaufwerke (Галле).