

Продление срока службы колес

Разработанные в последнее время марки специальных сталей для изготовления колес подвижного состава характеризуются сочетанием таких свойств, как высокие пластичность и циклический предел текучести. В процессе опытной эксплуатации на рудовозной линии Malmbanan в Швеции колеса из таких сталей продемонстрировали уникальную сопротивляемость возникновению вредных последствий контактной усталости качения (rolling contact fatigue, RCF), что позволяет прогнозировать существенное продление их срока службы в сравнении с колесами из сталей обычных марок. Кроме того, использование имитационного моделирования с целью прогнозирования износа колес показало существенные преимущества тесного сотрудничества специалистов академической науки и железнодорожной промышленности.

Изменившиеся условия эксплуатации

В последнее десятилетие на специализированных линиях с высоким грузооборотом осевые нагрузки возросли с 25,0 до 37,5 т, а в отдельных уникальных случаях даже до 40,0 т. Это связано с тем, что повышение осевых нагрузок позволяет получить существенный экономический эффект, однако с технической точки зрения достижение каких-либо преимуществ неизбежно влечет за собой дополнительные расходы.

Одним из последствий увеличения осевых нагрузок является неспособность колес и рельсов, изготовленных из стали традиционных марок, соответствовать новым предъявляемым требованиям. Это особенно характерно для линий с высокой интенсивностью движения тяжеловесных поездов и стало поводом для исследований и разработок стали новых перспективных марок для изготовления колес и рельсов, которые удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым в этом специфическом секторе железнодорожных перевозок.

Опыт компании Lucchini RS

Компания Lucchini RS (Италия, г. Ловере), одна из крупнейших в Европе среди изготовителей железнодорожных колес, располагает большим опытом разработки специальных сталей, отчасти благодаря многолетней деятельности в направлении их постоянного совершенствования. Использование данных, получаемых в результате обследования эксплуатируемых колес, позволяет иметь информацию для проведения металлургического анализа и более детальных исследований. Результатом осуществления соответствующей исследовательской программы стало создание ряда специальных сталей для изготовления цельнокатаных железнодорожных колес с улучшенной износостойкостью и устойчивостью к вредным последствиям явлений RCF.

Как и в ходе любого другого совершенствования, отправной точкой стал всесторонний анализ проблемы. В случае с колесами из стали обычных марок специалисты Lucchini установили, что основными причинами возникновения не-

исправностей являются износ, который обычно проявляется в виде ползунов и подрезки гребней колес, и различные последствия явлений RCF — выкрашивание, чешуйчатое отслоение металла и образование микротрещин.

До последнего времени железные дороги чаще всего пытались устранить вредные последствия высоких осевых нагрузок за счет совершенствования технологии и оборудования для смазывания рабочих поверхностей колес и рельсов, а также использования высокопрочных сталей при изготовлении колес. Эти меры хотя и снижали темп износа, но делали вредные последствия явлений RCF еще более существенными, причем на рабочих поверхностях как колес, так и рельсов.

Выкрашивание и отслоение металла

Вредные последствия явлений RCF ориентировочно разделяют на два типа: трещины, зарождающиеся на поверхности (выкрашивание металла), вызываемые проскальзыванием или термическими напряжениями, и трещины, зарождающиеся под поверхностью (отслоение металла), обусловленные контактными нагрузками по Герцу. В таких случаях множественные циклы высоких напряжений приводят к возникновению трещин в подповерхностном слое металла, которые из-за цикличности нагружения могут распространяться в поверхностный слой. Риск зарождения трещин концентрируется в слое металла от рабочей поверхности колеса до глубины 6,0 мм.

Трещины, зарождающиеся на поверхности колеса и вызываемые проскальзыванием, являются следствием накопления холодных пластических деформаций. При каждом цикле нагружения происходит небольшая дополнительная пластическая деформация. При этом

накапливающаяся деформация может превысить допустимые пределы, определяемые вязкостью металла. Когда это происходит, возникают трещины, дальнейший рост которых приводит к выкрашиванию металла.

Выкрашивание может также быть результатом термических нагрузок, вызываемых воздействием тормозных колодок на поверхность катания колеса с выделением значительного количества тепла. При этом в поверхностном слое металла формируется мартенситная структура, поскольку он быстро прогревается за счет трения, а потом быстро остывает за счет значительной массы колеса.

Быстрому развитию трещин может также способствовать влага, образующаяся при таянии снега или льда и проникающая в трещины. При каждом обороте колеса в трещинах, заполненных водой, происходит как бы гидравлический удар.

Пути предотвращения повреждения

В целях предотвращения развития сетки трещин и дальнейшего глубокого выкрашивания металла рабочие поверхности колес обычно подвергаются регулярной обточке. Однако эта операция весьма затратна. Определенных расходов требует сам по себе процесс перепрофилирования рабочих поверхностей, но для компаний — операторов грузовых перевозок или владельцев грузовых вагонов более существенное снижение экономической эффективности эксплуатационного процесса обусловлено существенным сокращением жизненного цикла колес из-за каждой обточки. При этом перепрофилирование колес с поврежденными поверхностями катания необходимо по критериям безопасности, поскольку дефекты, являющиеся следствием явлений RCF, могут вызывать отслаивание определенного количества металла,

что в свою очередь приводит к уже сточению отрицательного воздействия на подшипники буксовых узлов и верхнее строение пути.

Масштаб проблемы хорошо иллюстрируют данные, собранные на железных дорогах Северной Америки, которые свидетельствуют, что в 2006 г. расходы на устранение дефектов рабочих поверхностей колес составили около 350 млн дол. США. При этом основными причинами повреждения колес были отслоение и выкрашивание металла.

В связи с изложенным компания Lucchini RS приняла решение работать в двух направлениях. Первое направление — разработка технологий, позволяющих улучшить эксплуатационные показатели применяемых колесных сталей современных марок, второе — разработка колесных сталей инновационных марок.

Уже разработанная колесная сталь специальной марки, получившая название Uplos, создавалась с целью доведения технико-эксплуатационных характеристик колес до уровня, превышающего предписанный требованиями Международного союза железных дорог (МСЖД), европейских стандартов (EN) и спецификаций Ассоциации американских железных дорог (AAR). Эта улучшенная сталь, по мнению специалистов Lucchini RS, уже сейчас может быть эффективно использована для изготовления колес без необходимости в дополнительной процедуре одобрения заинтересованными сторонами.

Целью создания инновационных колесных сталей является дальнейшее продление срока службы колес в условиях, когда соблюдение требований МСЖД, EN и AAR как по химическому составу, так и по механическим свойствам не является обязательным, хотя спецификации AAR имеют для железных дорог Северной Америки с тяжелыми условиями эксплуатации преимущественную силу. При-

менение железнодорожных колес, изготовленных из инновационных сталей, предполагается также в тех случаях, когда колеса из стандартных сталей не могут удовлетворить требования заказчиков.

Важно отметить, что разработка и внедрение в производство колес из инновационных сталей требуют тесного взаимодействия многих сторон: научно-исследовательских институтов в области металлургии и металлургической промышленности, проектировщиков и изготовителей колес, рельсов и железнодорожного подвижного состава, компаний — операторов инфраструктуры и перевозочной деятельности, а также потребителей транспортных услуг. Кроме того, существует культура постоянного совершенствования технических устройств, поддерживаемая непрерывной обратной связью с теми, кто эксплуатирует их в реальных условиях, и информация об их опыте должна учитываться в процессе разработок. В идеальном случае должны иметь место оптимизационные циклы совершенствования — от разработчика к пользователю и от пользователя к разработчику.

Фактическая ситуация с инновационными колесными сталями такова, что их всестороннее признание и внедрение происходит в настоящее время и будет происходить в будущем весьма медленно. Отчасти это объясняется традиционной консервативностью железнодорожной отрасли, а также тем, что колеса из уже разработанных сталей имеют достаточно высокие эксплуатационные показатели при условии выполнения традиционных мер по продлению срока службы колес в эксплуатации.

Разработка перспективных технологий, вне всякого сомнения, является процессом комплексным и весьма дорогостоящим, поскольку требует значительных инвестиций на проведение научных исследований, направленных на создание новых материалов и процессов.

Колесная сталь новых марок

Специалисты металлургического сектора компании Lucchini RS провели исследование таких параметров колесных сталей, как пластичность, ударная и низкоциклическая вязкость и сопротивляемость трещинообразованию, которые могут служить критериями безопасности и соответствия предъявляемым критериям качества. Это потребовалось для дальнейшей разработки сталей, способных противостоять возникновению мартенситных структур на поверхности колес. Для этого в химический состав стали вводились компоненты, сдерживающие формирование аустенита при проскальзывании колес относительно рельсов с выделением тепла и, соответственно, его преобразование в мартенсит при быстром охлаждении. Одним из результатов этой работы стало создание колесной стали марки Uplos класса С+, которую ААР признала перспективной в плане изготовления колес для использования в тяжеловесном движении и

имеющей улучшенные эксплуатационные показатели в сравнении со стандартизированной ААР сталью класса С.

Однако, как следует из данных, приведенных в таблице, новая сталь марки Uplos класса С+ не отвечает некоторым требованиям, гарантирующим приемлемые рабочие параметры. Так, предел текучести на ободе колеса не удалось увеличить выше 900 МПа, а вязкость разрушения сравнительно низкая в сравнении с требованиями, действующими в европейских странах. Кроме того, способность этой стали замедлять формирование мартенситной структуры оказалась весьма низкой.

Сталь марки ААР класса С также обладает низким пределом текучести одновременно с высокой склонностью к формированию мартенситной структуры и, соответственно, к выкрашиванию металла. Это объясняется высоким содержанием углерода, марганца и кремния, добавление которых потребовалось для получения стали с минимально требуемой твердостью 380 НВ (по Бринеллю).

В поисках альтернативной колесной стали, превосходящей по механическим свойствам сталь марки Uplos класса С+, компания Lucchini RS разработала сталь, получившую название Micralos, отличительной особенностью которой является наличие в химическом составе большего числа компонентов, но в малом количестве. Колеса из этой стали прошли испытания в весьма тяжелых эксплуатационных условиях на севере Европы. Сталь Micralos отличается низким содержанием мартенситных и бейнитных структур после закалки и небольшое содержание углерода в сравнении со сталью марки Uplos класса С+. Прочие химические элементы дозированы в сплаве с большой тщательностью.

При создании стали марки Micralos компания учла необходимость ее соответствия современным требованиям по устойчивости к последствиям явлений RCF и вязкости разрушения. Что существенно, циклический предел текучести подбирался с учетом разрушающего напряжения и вязкости разрушения. Это сделано с целью получения определенного соотношения между показателями циклического предела текучести, циклического сопротивления и усталостными параметрами, которые непосредственно влияют на пластичность стали, а также параметрами линейного упругого разрушения. Полученные результаты убедительно доказали, что сталь марки Micralos обладает оптимальным сочетанием пластичности, вязкости разрушения и циклического предела текучести, вследствие чего соответствует всем требованиям, предъявляемым к колесным сталям для тяжелых условий эксплуатации, о чем свидетельствуют данные таблицы.

Известно, что стали с бейнитной структурой (а именно к таким сталям относится Micralos) обычно имеют меньшую износоустой-

Механические характеристики колесной стали разных марок (на ободе)

Параметр	Требования для использования в тяжеловесном движении	Значение параметра		
		ААР класса С	Uplos класса С+	Micralos
Твердость, НВ	370–410	350	380	390
Предел текучести при постоянной нагрузке, 0,2%, МПа	Не менее 900	700	900	1150
Циклический предел текучести, 0,2%, МПа	Не менее 800	650	710	860
Предельная прочность на растяжение, МПа	1100–1350	1150	1310	1280
Удлинение до разрушения, %	Не менее 10	13	11	14
Относительное уменьшение площади поперечного сечения, %	Не менее 25	32	30	40
Пластичность	Не менее 0,29	0,38	0,36	0,51
Сопротивляемость ударной нагрузке, Дж	Не менее 20	13	10	25
Сопротивляемость ударной нагрузке при –20 °С, Дж	Не менее 15	8	5	20
Вязкость разрушения при –20 °С, МПа \sqrt{m}	Не менее 100	50	45	136

чивость в сравнении со сталями с перлитной структурой при одинаковом уровне твердости. Однако у стали марки Micralos этот недостаток компенсируется улучшенными показателями устойчивости к последствиям явлений RCF. Кроме того, эта сталь имеет низкое содержание углерода и высокий уровень ударной вязкости, что замедляет возникновение и развитие поверхностных и подповерхностных дефектов в колесах.

В связи с этим компания Lucchini RS задалась целью продления срока службы колес из стали марки Micralos, особенно при эксплуатации в сложных климатических условиях и с высокими осевыми нагрузками, при которых колеса из стали с перлитной структурой требуют высоких расходов на переточку профиля из-за выкрашивания и отслоения в поверхностном слое металла с высоким риском возникновения недопустимых дефектов.

Испытания

Колеса, изготовленные из стали марки Micralos, подвергались опытной эксплуатации в самых сложных, насколько это возможно, условиях. Выбор пал на принадлежащую горнорудной компании ЛКАВ (Швеция) рудовозную линию Malmbanan, которая на значительном протяжении проходит севернее Полярного круга, где сезонные колебания температуры воздуха составляют от +30 °С летом до -40 °С зимой. Поезда, обращающиеся на этой линии, доставляют железную руду от мест добычи близ городов Кируна и Елливаре (Швеция) в порты Нарвик (Норвегия) на побережье Норвежского моря и Лулео (Швеция) на побережье Ботнического залива.

Поставка на эту линию новых вагонов типа UNO, расчетная осевая нагрузка которых составляет 30,0 т, а предельная грузоподъемность равна 100 т, началась в 1999 г.

В ходовой части этих вагонов применены радиально направляемые тележки типа Scheffel, оснащенные обычными колодочными тормозами. Количество тепла, выделяемого при воздействии тормозной колодки на обод колеса, может достигать 40 кВт, что вызывает значительный рост температуры в поверхностных зонах колодок и колес.

В ходе начального этапа эксплуатации вагонов типа UNO был выявлен ряд недостатков, обусловленных возникновением дефектов колес, изготовленных из распротраненной стали марки AAR класса C. У этих колес возникали поверхностные трещины и выкрашивания, вызванные термическими перегрузками. При этом дальнейшее радиальное распространение трещин приводило к риску излома колеса и требовало частых переточек поверхности катания, что существенно сокращало срок службы колесных пар. Проектный срок службы таких колес был установлен равным 700 тыс. км пробега, в то время как фактический составлял лишь 250–540 тыс. км.

В период с января 2004 по сентябрь 2006 г. экспериментальный поезд (рис. 1), в состав которого входили вагоны, оснащенные колесами из стали марки Micralos, проходил опытную эксплуатацию на кольцевом маршруте Елливаре – Лулео общей протяженностью 440 км. При этом общая масса груженого состава из 68 вагонов составляла 8600 т брутто, скорость его движения при доставке угля в порт достигала 60 км/ч, а в порожнем состоянии при движении в обратном направлении – 70 км/ч.

Из 10 опытных вагонов шесть были полностью оснащены колесами из перспективной стали, а остальные четыре имели колесные пары с такими колесами или по две на одной из тележек, или по одной на каждой тележке. Таким образом, всего испытаниям подверглись 60 колес из стали марки Micralos, и их



Рис. 1. Экспериментальный поезд из вагонов типа UNO на линии Malmbanan

эксплуатационные характеристики сопоставлялись с характеристиками остальных колес экспериментального поезда, изготовленных из стали марки AAR класса C.

Первым и важнейшим результатом, полученным во время испытаний, явилась необходимость раннего перепрофилирования поверхности катания колес из стали марки AAR класса C из-за наличия трещин, имевших термическую природу, и выкрашивания металла. Вследствие этого такие колеса пришлось заменить и утилизировать еще до завершения испытаний. Таким образом, полное сопоставление характеристик колес из обычной и перспективной стали оказалось весьма затруднительным.

Испытания также показали, что темп нормального износа колес из стали марки Micralos несколько превышает аналогичный показатель колес из стали марки AAR класса C до момента их обточки, но ни одно из опытных колес не потребовало перепрофилирования из-за каких-либо дефектов на поверхности катания.

В настоящее время компания Lucchini RS продолжает работу по совершенствованию стали марки Micralos в направлении улучшения механических характеристик с целью снижения темпа износа и повышения сопротивляемости вредным последствиям явлений RCF.

Исследования Bombardier и КТИ

В связи с глобальными тенденциями к урбанизации, возникновению заторов в движении различных средств наземного транспорта, а также с учетом необходимости бережного отношения к окружающей среде возникли беспрецедентные требования к увеличению объемов железнодорожных перевозок, вследствие чего подвижной состав и инфраструктура железных дорог во многих случаях приблизились к пределу своих эксплуатационных возможностей.

Это, в свою очередь, стимулировало исследование процессов, происходящих в области контакта колес и рельсов, с целью совершенствования их взаимодействия и оптимизации его параметров. Принимая во внимание важность точного прогнозирования темпов износа с целью определения момента нарушения оптимального профиля рабочих поверхностей колес и рельсов и наступления необходимости в замене этих взаимодействующих компонентов, решением данной проблемы занимаются специалисты как академической науки, так и соответствующих служб железных дорог.

В сложившейся рыночной ситуации внимание исследователей и разработчиков сосредоточено на изучении взаимодействия в системе колесо — рельс и улучшении эксплуатационных характеристик колес, в частности, по следующим направлениям:

- разработка современных технических требований, предъявляемых к колесам железнодорожного подвижного состава с учетом действующих и перспективных осевых нагрузок, тяговых усилий и скорости движения поездов;

- определение воздействия темпа износа колес на эксплуатационные расходы, которые зависят от многих (до десяти) факторов влияния;

- создание модели для оценки состояния путевой структуры, кото-

рая позволит обеспечить «дружественность» подвижного состава к пути;

- обеспечение технико-эксплуатационной совместимости сетей железных дорог с различными параметрами путевой структуры, что может оказывать влияние на напряжения, возникающие в области контакта колес и рельсов.

Принимая во внимание потенциальные преимущества, создаваемые наличием инструментария для анализа и прогнозирования темпа износа колес, компания Bombardier согласилась спонсировать работы Королевского технологического института (КТИ) Швеции в Стокгольме по разработке приемлемой имитационной модели системы колесо — рельс. При этом целью компании являлось получение возможности оптимизации процесса взаимодействия колес с рельсами для сокращения затрат жизненного цикла перспективного подвижного состава. Повышение точности прогнозирования темпа износа колес позволяет существенно повысить качество планирования их технического обслуживания и замены.

Экономический эффект от таких исследований возможен лишь при внедрении полученных положительных результатов в реальную эксплуатацию. В некоторых случаях целесообразно внедрение промежуточных результатов до завершения исследований в целом, однако далеко не всегда результаты исследований или разработанные технологии быстро вписываются в реальные условия железных дорог.

Ниже приведены некоторые результаты совместной работы компании Bombardier и КТИ по прогнозированию износа рабочих поверхностей колес.

Сложный механизм износа

Процесс, широко известный под названием «износ», в действительности является весьма сложным и

включает несколько видов повреждений материала и изменений состояния контактирующих поверхностей. Непосредственно на рабочих поверхностях колес и рельсов или на небольшой глубине под этими поверхностями в процессе эксплуатации могут происходить удаление или перемещение металла, его пластическая деформация, изменения структуры.

С точки зрения трибологии пара колесо — рельс является открытой системой, зависимой от геометрических параметров и формы обоих рабочих тел, а также от внешних условий. В этой системе возможны различные механизмы износа в зависимости от действующих нагрузок, наличия проскальзывания и смазывания зоны контакта. Причем в данном контексте смазывание рассматривается и как принудительное, и как случайное, обусловленное взаимодействием с окружающей средой. Процесс удаления металла с рабочих поверхностей колес обычно определяется несколькими пороговыми функциями, и даже незначительные изменения эксплуатационных условий могут весьма существенно влиять на изменение темпа износа контактирующих поверхностей.

С точки зрения механики твердых тел движение поездов на железных дорогах сопровождается циклическим нагружением колес и рельсов. В зависимости от осевых нагрузок и контактных напряжений на рабочих поверхностях колес возможно возникновение пластических деформаций и различных отрицательных последствий явления RCF. Зарождение в металле колеса усталостных трещин также является пороговым явлением.

Различные механизмы ухудшения состояния металла на рабочих поверхностях колес проявляются как дефекты нескольких видов. Повреждения могут представлять собой усталостные трещины, которые приводят к перемещению ме-

талла и выражаются в выкрашивании или отслаивании. Микроремещения металла возможны в сочетании с пластической деформацией, что может приводить к возникновению овальности поверхности катания и нарушению профиля поперечного сечения колес.

Фундаментальные научные исследования были проведены в специфических областях механизма износа, таких, как перемещение металла, возникновение и распространение явлений RCF, образование волнообразного износа рельсов и овальности колес.

Моделирование износа колес

КТИ проводит исследования механизма износа железнодорожных колес и рельсов с середины 1990-х годов. В начале этих работ тщательно измерялись и обследовались профили рабочих поверхностей колес и рельсов в условиях эксплуатации с созданием соответствующей базы данных, свидетельствующих о динамике происходящих процессов. Также изучалась эффективность принудительного смазывания колес и рельсов и наличие таких последствий явлений RCF, как трещины на поверхностях головок рельсов. Информация, собранная на этом этапе исследований, позволила лучше понять картину контакта колес и рельсов, механизм износа их рабочих поверхностей и на этой основе сформировать базу для создания достоверной модели износа колес.

Соответствующие теоретические исследования проводились в двух направлениях:

- тщательное изучение взаимодействия колес с рельсами, расчет контактных напряжений и величин пути проскальзывания;
- имитация реального процесса взаимодействия колес с рельсами с целью воспроизведения процессов трения и изменения поперечного профиля рабочих поверхностей колес.

Длительные эксперименты были направлены на изучение изменения механизма износа при принудительном смазывании контактирующих поверхностей колес и рельсов.

Модель потери материала

При моделировании процесса износа за основу была принята локальная версия теоретической модели Арчарда (J. Archard), в которой глубина износа Δz зависит от контактного давления p_z , длины пути проскальзывания Δs и твердости материала поверхности H и определяется по формуле $\Delta z = K (p_z \Delta s) / H$.

Коэффициент K в этой формуле определяется экспериментально для каждой пары материалов взаимодействующих тел. При этом коэффициент износа является функцией контактного давления и относительной скорости проскальзывания, которая во взаимодействии колес и рельсов обычно не превышает 1,0 м/с.

Такая модель взаимодействия колес и рельсов была введена в расширенную версию пакета программного обеспечения Fastsim, использованного в качестве дополнения после динамического моделирования. Глубина износа рассчитывалась для всей зоны проскальзывания в пятне контакта. Кроме того, учитывались реальные окружающие условия и возможное принудительное смазывание гребней колес.

При детальном анализе с использованием стандартного инструментария моделирования взаимодействия нескольких тел важно иметь в виду следующее. Модель износа основана на таких условиях контакта, которые воссоздаются программой динамического моделирования. Модели контакта колеса и рельса обычно создаются для расчета контактных сил, необходимых для уравнивания системы, а правила практического

моделирования предполагают разные подходы к подобным моделям. При этом тщательный анализ напряжений, необходимый для моделирования возникновения дефектов, становится наиболее важным и требует адаптации программного обеспечения.

Было установлено также, что в результате моделирования с использованием различных программных пакетов прогнозируемая площадь пятна контакта колеса и рельса при оптимальном расположении колесной пары в рельсовой колее и при набегании гребня на рельс существенно различается. Кроме того, существенно отлична интенсивность проскальзывания в зоне гребня.

Еще одним важным аспектом моделирования износа является, в частности, необходимость выявления близкорасположенных множественных точек контакта. Слияние этих точек в единое пятно контакта в процессе моделирования может привести к воссозданию нереальной и даже невозможной с геометрической точки зрения картины износа.

Перечисленные выше условия формируют важнейшие вводные условия для разработки модели износа. Можно сделать вывод, что в используемой модели контакта необходимо учитывать факторы ее применения на практике.

Системное моделирование

Модель износа была интегрирована в программное обеспечение MBS, использованное для расчета динамики ходовой части обычного подвижного состава с целью прогнозирования изменения поперечного профиля колеса в зависимости от совершенного пробега. Это внесло поправку в традиционный комплект имитации, который включает устойчивость против схода с рельсов, стабильность движения и плавность хода. Для

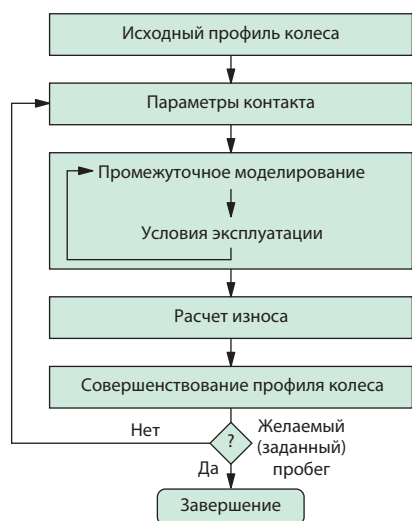


Рис. 2. Структура модели износа колес

расчетов динамики ходовой части компания Bombardier использовала имитационное программное обеспечение Simpack для системы многих тел, получившее наибольшее распространение при решении подобных задач.

Структура имитационной модели основана на двух контурах вложенных итерационных циклов (рис. 2). Во внутреннем контуре эксплуатационные условия могут меняться в зависимости от того, какой вид железнодорожных сообщений предстоит исследовать. В наружном контуре происходит подбор геометрических параметров профиля колеса. Важнейшими элементами этой процедуры являются:

- имитационный комплект: дискретизация рассматриваемого фрагмента сети, представленной адекватным выбором моделируемых ситуаций;

- динамическая модель: модель ходовой части рассматриваемого подвижного состава в программном обеспечении MBS;

- модель повреждаемости: взаимозависимость между параметрами контакта колеса и рельса, главными из которых являются напряжения, проскальзывание и количество металла, удаленного с рабочих поверхностей в процессе износа;

- накопление повреждений: обновление геометрических параметров профиля колеса с учетом фактической картины контакта.

Все переменные, относящиеся к пути, подвижному составу и условиям эксплуатации, сконцентрированы в имитационном комплексе. Основу этой работы составляет дискретизация рассматриваемого фрагмента сети в виде набора прямых и кривых, характеризующихся их радиусами. Одновременно с этим могут быть заданы такие прочие параметры, как скорость движения поезда, коэффициент трения между колесами и рельсами, профиль головки рельсов, тормозные и тяговые усилия, отклонения от номинальной геометрии пути, загрузка вагонов, состояние пути и подвижного состава. Для обеспечения полного и детального моделирования выбор соответствующих параметров должен основываться на изучении их влияния на процесс износа колес.

Расчетные геометрические параметры пути первоначально дискретизировались с использованием радиусов круговых частей каждой кривой. В реальных условиях кривые фактически группируются в кластеры по радиусам и для каждого типа определяется характерная кривая. Если на отдельных участках линии интенсивность движения поездов больше, чем на других, для разных комплектов геометрических параметров пути могут быть введены весовые коэффициенты.

Геометрические параметры головки рельсов оказывают существенное влияние на развитие дефектов колес. В связи с этим профиль рельса является весьма важным переменным элементом имитационного комплекта. Нарушения геометрических параметров пути оказывают влияние на расположение пятна контакта в системе колесо — рельс и на интенсивность проскальзывания, что также должно быть учтено при моделировании.

Специфика многопрофильной компании

Для такой транснациональной компании, как Bombardier, одним из основных условий успешной деятельности является максимально полное удовлетворение требований заказчиков в каждом сегменте международного рынка. Вместе с тем ей необходимо правильно оценивать и обобщать достижения и опыт, полученные в различных эксплуатационных условиях. Таким образом, инженерные разработки компании координируются как в локальном, так и в глобальном масштабе.

При разработке любым поставщиком методов технической поддержки и фирменного сервиса проданных технических средств желаемый результат может быть достигнут при использовании мирового опыта в этой сфере, но в данном случае проблема усугубляется многопрофильностью деятельности компании Bombardier. Кроме того, помимо исследований, направленных на решение научно-технических проблем, для каждого бизнес-проекта необходимо проведение маркетинговых исследований и расчетов экономической эффективности.

Следующая важная проблема возникает при внедрении результатов научных исследований в реальный бизнес, когда необходимо решить часто недооцениваемую задачу перехода от отчетов о проделанной работе к решению повседневных технических задач. Определенные затруднения возникают даже на стадии преобразования уже завершенных промышленных разработок в производственные технологические процессы, что необходимо учитывать при расчетах себестоимости продукции. Дополнительные проблемы обусловлены противоречиями между ожидаемой потребителем и фактической продолжительностью процессов, связанных с разработкой технических инноваций и доведением их до готовно-

сти к внедрению, а также между открытостью научно-технической информации и правами на интеллектуальную собственность. Необходимо также иметь четкое представление о различии эксплуатационных условий у разных пользователей.

Наиболее рациональный путь от разработки перспективного технического решения до общего восприятия соответствующих технологий далеко не всегда является простым и очевидным. Во многих случаях целесообразно участие в процессе некоторых промежуточных звеньев — посредников между академической наукой и промышленностью. Эту в зависимости от характера решаемых задач роль могут выполнять консультационные фирмы, разработчики программного обеспечения или специализированные институты.

Эффективной представляется следующая последовательность стадий создания новой техники:

- долгосрочные теоретические исследования;
- несколько менее продолжительные прикладные исследования;
- среднесрочное по продолжительности создание и внедрение удобного для пользователей программного обеспечения;
- краткосрочный информационный период, включающий обеспечение взаимопонимания сторон;
- среднесрочная по продолжительности разработка продукта;
- весьма краткосрочный период выведения продукта на рынок с устранением обнаруженных недостатков.

В данном конкретном случае исследований и разработок первые две стадии указанной последовательности были выполнены КТИ, третью выполнили совместно компании Simpack и Bombardier, последние две — компания Bombardier. Полученный при этом опыт показал, что на всех стадиях процесса обязательно участие конечного пользователя, а также (в слу-

чаях, подобных рассматриваемому) поставщика программного обеспечения.

Права на интеллектуальную собственность, возникшую в ходе исследований и разработок, реализованы следующим образом. Результаты теоретических исследований были открыты для всех. Функциональность общего программного обеспечения открыта для пользователей, приобретших соответствующие лицензии. Внутреннее ноу-хау внедряется согласно соответствующим правилам и процедурам покупателя-пользователя. Как это принято в научной сфере, результаты исследований публиковались в виде отчетов, статей и тезисов, однако коды относящегося к ним программного обеспечения не раскрыты.

Пример применения

Моделирование прогрессирующего износа в целях получения достоверной информации о поведении колес и механизме их повреждения выполнено для подвижного состава нескольких типов в поездах различной составности, используемых в разных режимах эксплуатации. На стадии внедрения результатов моделирования необходимо также использовать любую возможность для дополнительного подтверждения достоверности разработанной модели по мере того, как становится доступной информация, получаемая в ходе новых измерений.

В качестве примера можно привести исследования, касающиеся износа поверхностей катания колес, выражающегося в виде проката.

Конструкция ходовой части современного подвижного состава, как правило, обеспечивает достаточную направляемость колесных пар в кривых, что способствует существенному снижению износа гребней колес. Однако вследствие этого предметом особого внимания становится износ другого вида — прокат, который имеет место преимущественно в прямых.

В данном контексте представляет интерес случай, когда некоторое число современных электропоездов было снято с эксплуатации на второстепенных участках с большим количеством кривых малого радиуса и направлено на магистральную линию с преобладанием прямых. Различия в числе и радиусах кривых, расположенных на второстепенных участках и магистральной линии, проиллюстрированы на рис. 3. Видно, что на магистральной линии значительно меньше кривых среднего радиуса и больше прямых.

Однако ходовая часть перемещенных электропоездов изначально была спроектирована исходя из улучшения характеристик по радиальному вписыванию в кривые, и, когда они уже накопили определенный пробег в новых условиях эксплуатации, произошло существенное ухудшение плавности хода при движении с расчетной (до 200 км/ч) скоростью, а на поверхностях ката-

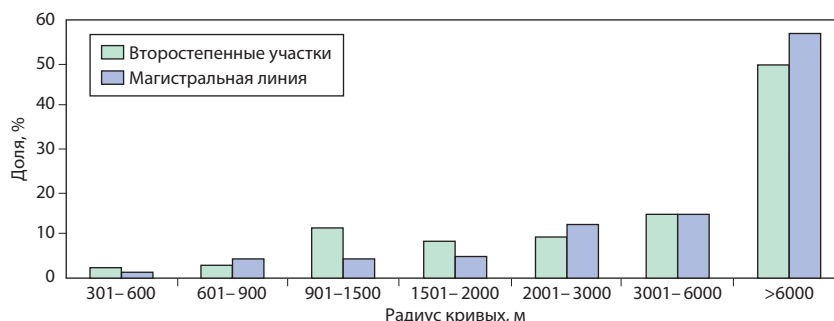


Рис. 3. Доли кривых разного радиуса в общей длине второстепенных участков и магистральной линии

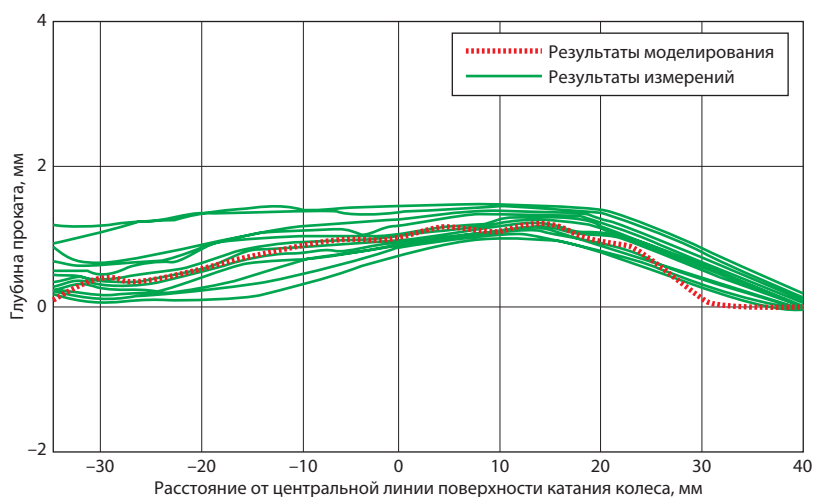


Рис. 4. Результаты моделирования и измерения фактической глубины проката на поверхностях катания колес

ния колес обнаружен износ в виде проката.

В связи с этим выполнено моделирование, целями которого были выявление зависимости возникновения и развития данного дефекта от накопленного пробега, определение причин этого явления и разработка эффективных мер по его предотвращению. На рис. 4 представлены результаты моделирования развития проката в сопоставлении с результатами измерения фактической его глубины на поверхностях катания 16 выбранных колес электропоездов после пробега 164 тыс. км. Видно близкое совпадение теории и практики. Использование разработанной для данного случая модели позволило изучить влияние условий эксплуатации на характер износа и сделать прогноз его развития.

В целях предупреждения этого отрицательного явления у электропоездов конкретного типа было принято решение о модернизации гасителей угловых колебаний (влияния) с последующим тщательным контролем состояния поверхностей катания колес.

Таким образом, было установлено, что конструкция ходовой части подвижного состава должна

строго соответствовать специфическим условиям его эксплуатации. Полученный в ходе исследований и испытаний опыт предусмотрено в дальнейшем использовать при проектировании нового подвижного состава.

Успешное внедрение

Практическое использование разработанной учеными прогностической модели оказалось успешным в том смысле, что применимость этого инструментария в настоящее время признана в общей инженерно-технической среде. Однако не следует недооценивать важность усилий, необходимых для дальнейшего совершенствования и расширения масштабов внедрения разработанных моделей даже для тех случаев, когда с точки зрения академической науки их создание полностью завершено.

В процессе перехода от разработки перспективных научных методик к их практической реализации имеются несколько трудностей, которые необходимо преодолеть. К ним относятся наличие противоречивых требований и целей, недопонимание эксплуатационных условий и недостаточно тщательное из-

учение рынка. В связи с этим целесообразно привлечение различных организаций-посредников со специализацией, зависящей от характера решаемых задач. Но если указанные проблемы правильно решены, плодотворное сотрудничество между научными организациями и промышленными предприятиями не только возможно, но и необходимо, так как приносит выгоды всем участникам процесса.

Организованное таким образом практическое применение научных разработок в рассмотренной выше области позволяет достичь глубокого понимания процесса возникновения и развития дефектов и отклонений от номинального профиля поверхности катания колес. Вместе с тем до настоящего времени моделирование использовалось в основном в качестве дополнительной меры при решении частных задач для специфических условий эксплуатации. Если программное обеспечение процесса имитации будет использоваться в качестве одного из инструментов проектирования, возникнет необходимость в формулировании конструктивных критериев для соответствующих параметров. Поскольку процедура прогнозирования износа колес хорошо отработана для нормальных эксплуатационных условий, в дальнейшем потребуется ее совершенствование, которое понадобится, в частности, при изучении процессов, происходящих, например, при пониженном коэффициенте сцепления колес с рельсами.

Тем не менее на основании изложенного можно сделать вывод, что рассмотренные методики и средства моделирования доказали свою эффективность при оценке параметров взаимодействия колес с рельсами и их ждет дальнейшее развитие.

A. Ghidini, R. Enblom. *Railway Gazette International*, 2010, № 3, p. 30–38.