

Шлифование рельсов на железных дорогах Северной Америки

Эффективным методом оптимизации взаимодействия между сталью колеса и рельса является, как показали результаты исследований и практический опыт, превентивное (иначе, профилактическое или предупредительное) шлифование рельсов.

Конечная цель системы текущего содержания рельсов — обеспечение наибольшего срока их службы без снижения уровня безопасности движения поездов и увеличения расходов на устранение последствий непредвиденных повреждений. Эта цель достигается, когда рельсы заменяют по причине предельного износа в процессе обычной эксплуатации, а не из-за недопустимого развития дефектов, вызванных явлениями контактной усталости. Поэтому на железных дорогах Северной Америки принята практика шлифования рельсов (главным образом, для устранения поверхностных дефектов контактно-усталостного происхождения с целью предупреждения их опасного развития) в сочетании с надлежащей лубрикацией.

Основным элементом метода превентивного шлифования является создание и поддержание оптимального профиля рельсов.

Для оказания содействия в достижении наибольшего срока службы рельсов подкомитет 9 комитета 4 Американской ассоциации строительства и содержания железнодорожного пути (AREMA) провел обследование железных дорог нескольких стран мира, имеющих большой опыт применения наиболее совершенных методов и технологий шлифования рельсов в целях сбора необходимых сведений и обобщения практики применения этих методов для издания руководства по этому вопросу. Приведенная в руководстве информация поможет железным дорогам, которые еще не переняли этот передовой опыт, приступить к внедрению наиболее прогрессивного превентивно-поэтапного метода шлифования рельсов.

Основные особенности оптимальной технологии шлифования

В настоящее время оптимальную технологию шлифования рельсов широко применяют следующие железнодорожные компании и администрации:

в Северной Америке

- Canadian Pacific (CPR) — с 1989 г.;

- Canadian National (CN) — с 1989 г.;
- Burlington Northern and Santa Fe (BNSF) — с 1991 по 1995 г. и с 1998 г.;
- Union Pacific (UP) — с 2000 г.;
- CSX Transportation (CSXT) — с 2001 г. в других регионах мира
- BHP Billiton (Австралия) — с 1989 г.;
- Queensland Rail (QR, Австралия) — с 1995 г.;
- Companhia Vale do Rio Doce (CVRD, Бразилия) — с 1990-х годов;
- Network Rail (Великобритания) — с 2002 г.

В табл. 1 представлены усредненные количественные характеристики метода превентивного шлифования по указанным выше железным дорогам Северной Америки. Видно, что важнейшей особенностью его организации является возможно большее снятие металла за один проход с помощью высокопроизводительных рельсошлифовальных машин. Тем самым на обработку участка пути определенной длины требуется меньшее число проходов. Это имеет большое экономическое значение, так как позволяет более эффективно использовать шлифовальную технику и создает меньше помех движению поездов.

При корректирующем шлифовании для удаления значительных поверхностных дефектов требуется несколько проходов высокопроизводительной шлифовальной машины. Этот метод неэкономичный, и его применения можно избежать, если перейти на метод превентивно-поэтапного шлифования, кото-

Таблица 1

Характеристики превентивного шлифования рельсов

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Число высокопроизводительных рельсошлифовальных машин (с 84 или 96 камнями, приводимыми во вращение электродвигателями мощностью 30 л. с.) | 14 |
| Длина обработанного пути, тыс. км | 125,8 |
| Общий рабочий пробег рельсошлифовальных машин, тыс. км | 140,5 |
| Среднее число проходов по каждому обрабатываемому месту | 1,12 |
| Средняя рабочая скорость при шлифовании, км/ч | 10,3 |
| Среднесуточная продолжительность рабочей смены, ч | 12 |
| Среднесуточная полезная продолжительность работы машин, ч | 3,8 |
| Среднесуточная производительность машин, км | 23,4 |

рый был разработан Национальным исследовательским советом Канады (NRC) в 1998 г. для железной дороги BNSF.

Оптимизация метода

Оптимальный метод шлифования рельсов включает следующие характеристики и действия:

- сбалансированность процессов износа и накопления контактной усталости рельса;
- максимальный срок службы рельсов при минимальном риске разрушения;
- систематическое исправление геометрических параметров рельсов;
- поддержание вертикального профиля рельсов в пределах допусков с постоянным контролем волнообразного износа и состояния сварных стыков;
- применение профилей рельсов, которые способствуют снижению износа и контактных напряжений, а также повышают устойчивость движения;
- соответствие цикличности шлифования геометрическим параметрам пути;
- минимальная удельная (на 1 км) стоимость шлифования;
- постоянство качества поверхности рельсов по всей длине участка (чистота обработки, вертикальный профиль, контролируемая ширина фаски и т. д.);
- минимальный риск возникновения пожара.

Оптимизация метода основывается на превентивном шлифовании рельсов, при котором с меньшими затратами средств, времени и минимальным снятием металла предотвращается возникновение контактной усталости поверхности катания и поддерживается заданный профиль рельса, соответствующий местным условиям эксплуатации.

Предотвращение развития трещин

Интенсивность роста поверхностных и подповерхностных трещин усталостного происхождения определяется уровнем напряжений в контакте колеса и рельса. Микротрещины зарождаются в наиболее напряженной поверхностной зоне головки и медленно развиваются в глубь металла. Затем трещины вступают в стадию ускоренного роста под небольшим углом, пока не достигнут стадии разветвления. На этом этапе значительно ускоряется рост трещин в вертикальном направлении.

Превентивное шлифование предусматривает удаление тонкого слоя металла при интервалах между очередными проходами рельсошлифовальной машины, зависящих от радиуса кривых и грузонапряженности линии. Регулярное снятие наиболее повреж-

денного слоя металла на стадии медленного роста трещин позволяет предотвратить их ускоренное развитие. Высокопроизводительные шлифовальные машины могут удалять слой металла с короткими микротрещинами за один проход. Путем удаления слоя металла только необходимой толщины без излишней потери рельсовой стали и существенного уменьшения высоты рельсов можно воспроизводить интенсивность их естественного износа.

Трещины усталостного происхождения на поверхности рельсов наиболее интенсивно развиваются при попадании в них воды и в меньшей степени — при загрязнении смесью воды и смазки. С другой стороны, надлежащая лубрикация снижает напряжения от тягового усилия на рабочей выкружке рельсов. Благодаря этому увеличивается число циклов нагружения, требующихся для возникновения на поверхности рельса явлений контактной усталости. По этой причине превентивное шлифование, при котором удаляются поверхностные трещины, в сочетании с лубрикацией может существенно увеличить срок службы рельсов. Однако нанесение смазки на уже поврежденный рельс может увеличить интенсивность роста трещин.

Если при смазывании рабочей грани головки поверхность катания наружного и внутреннего рельсов кривых остается сухой, возрастают углы набегания гребней колес на рельсы, что приводит к увеличению поперечных сил и контактных напряжений на рабочей выкружке наружного рельса. Это может вызвать выкрашивание металла в этих местах. Для устранения этого явления необходимо шлифовать рельсы для удаления на рабочей выкружке слоя металла толщиной не менее 0,4 мм под углом 45 град, чтобы компенсировать увеличение поперечных сил и еще больше, в дополнение к лубрикации рельсов, снизить интенсивность износа.

При уширении колеи более чем на 12,7 мм в кривых малого радиуса возникает контакт ложного гребня изношенных колес с поверхностью катания внутреннего рельса, что способствует возникновению очень высоких контактных напряжений и ухудшает вписывание экипажей в кривые.

Устранение волнообразного износа

Волнообразный износ устраняется превентивным шлифованием и надлежащей лубрикацией. Волнообразные неровности иницируются на головке рельсов процессом обезуглероживания вновь выплавленной стали и неровностями производственного происхождения, возникающими при прокатке рельсов, а также контактно-усталостными дефектами, неудовлетворительно выполненными сварными и болтовыми стыками и др. Благодаря удалению

волн на поверхности рельсов путем шлифования динамические силы между колесом и рельсом значительно снижаются, что способствует продлению срока службы элементов верхнего строения пути.

Волнообразный износ, как и усталостные трещины, вначале развивается медленно, однако по мере увеличения амплитуды неровностей интенсивность нарастания возрастает. Достаточно частое превентивное шлифование позволяет контролировать волнообразный износ путем снятия слоя металла необходимой толщины за один проход как с сохранением при этом требуемого профиля рельсов, так и с удалением неровностей, возникших после предыдущего шлифования. Если волнообразные неровности не удаляются за один проход, следует провести повторное шлифование. В противном случае оставшиеся неровности могут развиваться до недопустимой степени раньше следующего цикла шлифования.

Оптимизация профиля рельсов

В условиях эксплуатации рельсы контактируют с колесами различного профиля — новыми, сильно изношенными, с прокатом, с гребнями разной толщины. При проектировании оптимального профиля рельсов для кривых и прямых участков пути используется программное обеспечение оптимизации профиля, разработанное NRC. Оптимизация профиля позволяет свести к минимуму контактные напряжения в рельсах, повысить устойчивость движения и улучшить вписывание в кривые. По мере изменения эксплуатационных условий, внедрения усовершенствованных технологий содержания пути и более твердой и износостойкой рельсовой стали оптимальные профили изменялись.

Профиль рельсов для прямых обычно проектируют с радиусом кривизны поверхности катания головки, равным 200 – 250 мм, и шириной полосы качения, равной примерно 25 мм. Полоса качения может быть специально смещена к наружному или внутреннему краю головки рельса. Контролируемое смещение зоны контакта поперек рельса расширяет площадку износа на поверхности катания колеса, что способствует уменьшению числа колес с прокатом седлообразной формы и снижению интенсивности развития проката. Устранение проката уменьшает контактные напряжения в рельсах и необходимый объем работ по шлифованию, снижает поперечные силы во взаимодействии колес и рельсов, а также увеличивает срок службы колес и сокращает расход топлива на тягу поездов.

Профиль наружных рельсов в кривых должен устранять повышенную концентрацию напряжений, которая способствует проявлениям контактной усталости, и в то же время улучшать вписывание в кри-

вые экипажей с изношенными колесами. Усовершенствованные профили следует проектировать отдельно для кривых большого, среднего и малого радиуса. Улучшенное вписывание в кривые и контролируемое распределение контактных напряжений снижают износ колес, рельсов и контактную усталость, а также уменьшают расход топлива локомотивами.

Оптимальный профиль внутренних рельсов в кривых также должен устранять концентрацию напряжений, создаваемых колесами с прокатом и уширением колеи, особенно на линиях с тяжеловесным движением. Недавно разработанный NRC усовершенствованный профиль для внутренних рельсов позволил значительно уменьшить потребность в снятии металла с наружной их грани и повысить эффективность шлифования за один проход.

Поперечный профиль рельсов измеряют с помощью специальных шаблонов, закрепляемых на штанге и используемых при ручных измерениях. Шаблон должен охватывать весь рельс от рабочей выкружки в сечении под углом 45 град до наружного края головки, чтобы обеспечить правильное очертание рельса в этих критических местах. Обработанный профиль считается удовлетворительным, если по меньшей мере 80 % измерений на конкретном участке пути дают результаты, находящиеся в пределах допусков. Шаблон позволяет точно определять местоположение полосы контакта, за исключением случаев, когда в процессе эксплуатации значительно уменьшилась подуклонка рельса. Кроме того, применяются современные измерительные системы, например лазерные, устанавливаемые на подвижных средствах, в том числе на рельсошлифовальных машинах, и позволяющие получать данные о профиле рельсов в цифровом виде.

NRC недавно разработал шаблон для внутренних рельсов кривых, предназначенный для использования на железных дорогах первого класса. Его очертания соответствуют профилю рельса с радиусом кривизны поверхности катания, равным 250 мм, что позволяет уменьшить съем металла при шлифовании по сравнению с ранее применяемыми профилями.

Опытные участки

В связи с увеличением массы, длины и скорости движения поездов железные дороги внедряют новые материалы для элементов верхнего строения пути и усовершенствованные технологии его текущего содержания и ремонта. В этой связи особое значение приобретают опытные участки, выделяемые на линиях для определения наиболее рациональных режимов шлифования рельсов по снятию металла, позволяющих держать под контролем развитие кон-

Таблица 2

Средний срок службы рельсов на CPR при шлифовании и без него

| Критерии | Без шлифования | При корректирующем шлифовании | При превентивном шлифовании |
|--|----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Интенсивность износа рельсов, мм/млн. т брутто поездной нагрузки | 0,044 | 0,066 | 0,033 |
| Предельный износ рельсов, мм | 17 | 20 | 23,1 |
| Срок службы рельсов по износу, млн. т брутто поездной нагрузки | 425 | 333 | 766 |
| Срок службы рельсов по усталостным повреждениям, млн. т брутто поездной нагрузки | 300 | 450 | 1199 |

тактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов. Анализ снятых с этих участков образцов рельсов позволяет определять характер и направление роста усталостных трещин в металле и на основании этого устанавливать оптимальную толщину снимаемого слоя и соответствующие интервалы между циклами превентивно-поэтапного шлифования рельсов в разных условиях эксплуатации.

Опытные участки представляют собой наиболее подходящие места как для отработки технологии и режимов шлифования рельсов для конкретных условий, так и для внесения изменений в принятую его цикличность без риска получения неудовлетворительных результатов в масштабах линии или железной дороги. Любые осложнения при внедрении новых методов шлифования можно проконтролировать и количественно оценить на опытном участке. Всесторонние измерения в этих местах используются для расчета экономической эффективности шлифования при его применении, например, на линиях с рельсами новых типов или с усовершенствованной технологией управления трением.

Разработанный NRC совместно с BNSF метод предусматривает переход от корректирующего шлифования, при котором имеют место интенсивный износ и явления усталостного характера на поверхности катания, к превентивно-поэтапному, при котором рельсы сохраняются в работоспособном состоянии. Эта технология предусматривает превентивное шлифование с принятой цикличностью, обеспечивающее постепенное придание рельсам требуемого профиля и удаление поверхностных усталостных повреждений без предварительного дорогостоящего исправления профиля рельса.

В соответствии с этой технологией работа начинается с частых однопроходных шлифований, как при традиционном превентивном шлифовании, но с увеличением количества снимаемого каждый раз металла. Дополнительное снятие металла достигается за счет снижения скорости шлифования, а также увеличения мощности электродвигателей привода шлифовальных камней. Это позволяет сразу воспользоваться выгодами оптимизированного превентивного шлифования при поэтапном восстановлении профиля рельсов и удалении поверхностных трещин.

Процесс последовательного профилирования рельсов и удаления поверхностных трещин реализуется в три этапа. На первом этапе требуется от одного до двух циклов однопроходного шлифования для получения требуемого профиля рельсов. На втором этапе необходимы от двух до шести циклов шлифования, чтобы постепенно остановить зарождение новых трещин и снизить напряжения в оставшихся трещинах. На третьем этапе за четыре – девять циклов шлифования удаляются оставшиеся «стабильные» трещины, обеспечивается гладкая поверхность рельсов и восстанавливается упрочненный слой металла.

На линиях с тяжеловесным движением при использовании высокопроизводительных рельсошлифовальных машин в прямых и кривых большого радиуса и по наружной нити в кривых малого радиуса на весь процесс обычно требуется три цикла однопроходного шлифования; по внутренней нити в кривых малого радиуса с уширенной колеей — до девяти циклов. На линиях с преобладанием скоростного пассажирского движения при использова-

Таблица 3

Замена рельсов на CPR при шлифовании и без него

| Метод шлифования | Год | Интервалы между циклами шлифования, млн. т брутто поездной нагрузки | Объем замены рельсов, км | Стоимость замены рельсов, млн. дол. США (в приведении к 2003 г.) |
|------------------|------|---|--------------------------|--|
| Без шлифования | 1970 | — | 618 | 81 |
| Корректирующее | 1985 | 31,8 – 36,3 | 516 | 68 |
| Превентивное | 2003 | 22,7 | 454 | 65 |

нии аналогичных машин необходимы три цикла однопроходного шлифования для получения требуемого профиля, снижения контактных напряжений и устранения контактно-усталостных повреждений по наружной нити в кривых с большим недостатком возвышения.

Преимущества шлифования

Эксплуатационно-экономические показатели

Применение оптимальной технологии шлифования позволяет существенно продлить срок службы рельсов и снизить расходы на замену острodefектных рельсов. В табл. 2 приведены сведения о среднем сроке службы рельсов на железной дороге CPR при различных методах шлифования и без него.

Видно, что наибольший срок службы рельсов достигается при превентивном шлифовании, так как рельсы заменяют по достижении максимально допустимого износа, а не из-за повреждений усталостного характера. К тому же улучшение состояния поверхности катания рельсов при превентивном шлифовании позволяет применять более высокие значения допускаемого износа рельсов, чем без шлифования или при корректирующем шлифовании.

В табл. 3 представлены сведения об объемах замены рельсов на CPR в разные годы при различных методах шлифования и без него.

Из приведенных данных следует, что при корректирующем шлифовании годовая экономия затрат от уменьшения объема замены рельсов по сравнению с таковыми при отсутствии шлифования составляет 13 млн. дол., а расходы на проведение шлифования равны 8 млн. дол. При превентивном шлифовании годовая экономия затрат от уменьшения объема замены рельсов по сравнению с таковыми при отсутствии шлифования достигает 16 млн. дол., а расходы на шлифование равны 7,5 млн. дол. При этом следует учитывать, что объем перевозок на CPR за 1990 – 2003 гг. возрос более чем на 40 %, а перевозка навалочных грузов осуществляется в вагонах массой 130 т брутто, т. е. с высокой осевой нагрузкой.

Снижение числа дефектов

Представляет интерес анализ частоты возникновения дефектов усталостного характера в рельсах на железной дороге BNSF в зависимости от применяемой системы текущего содержания пути.

В 1987 г. применяли корректирующее шлифование рельсов в кривых с междуцикловыми интервалами 32 млн. т брутто поездной нагрузки. Поверхность катания рельсов находилась в хорошем состоянии,

однако из-за жесткого двухточечного контакта колес и рельсов интенсивность бокового износа последних была высокой.

В 1988 г. для снижения интенсивности износа перешли на конформный одноточечный контакт, но одновременно увеличили интервалы шлифования до 81 млн. т, а рабочую скорость рельсошлифовальных машин повысили на 40 %. В результате этого, а также из-за уменьшения объемов шлифования рабочей выкружки головки рельсов возросла усталостная повреждаемость рельсов в кривых и резко увеличилось число дефектов.

В 1991 г. режим шлифования рельсов вновь изменили, установив междуцикловые интервалы шлифования в кривых в диапазоне 16 – 36 млн. т поездной нагрузки, и одновременно перешли на слабый двухточечный контакт колес и рельсов.

К 1995 г. на BNSF метод превентивного шлифования был принят как основной. Поверхность катания рельсов вновь оказалась в хорошем состоянии, снизилось число усталостных дефектов в кривых. Однако еще до того, в 1994 г., ввиду структурных изменений (слияний и поглощений) возросли общая протяженность линий дороги, объемы перевозок, грузонапряженность, причем без увеличения численности парка рельсошлифовальных машин. К тому же производительность шлифовальных машин вследствие сокращения продолжительности окон стала снижаться.

Все это постепенно привело к тому, что к концу 1997 г. вновь получил распространение метод корректирующего шлифования с интервалом 55 – 180 млн. т брутто поездной нагрузки. Состояние поверхности рельсов быстро ухудшилось, а число усталостных дефектов в прямых увеличилось на 76 % по сравнению с 1994 г.

В 1998 г. BNSF пригласила NRC для исправления ситуации. В результате был разработан и в 1999 г. применен на части сети железной дороги превентивно-позападный метод шлифования, и число дефектов начало постепенно сокращаться.

Таким образом, опыт показывает, что оптимальная технология шлифования рельсов может дать значительное сокращение расходов на замену рельсов и уменьшить число дефектов. Большинство железных дорог первого класса осознали значимость превентивного шлифования, так как переход на этот метод позволяет не только экономить средства за счет продления срока службы рельсов, но и проводить шлифование с минимальными помехами для движения поездов.