

Рельсовая сталь — эволюция и перспективы

Перед тем как рассматривать современную ситуацию в области рельсовой стали, целесообразно проследить ее эволюцию со времени появления первых железных дорог, что поможет оценить перспективы развития нынешнего состояния дел и наметить направления совершенствования рельсов в целях дальнейшего повышения уровня безопасности движения поездов. Этому вопросу был посвящен международный семинар британского Института верхнего строения пути (Permanent Way Institution, PWI), состоявшийся в Брисбене (Австралия).

Первые металлические рельсы были изготовлены из чугуна в середине 1700-х годов и использовались для укладки параллельных рельсовых нитей, по которым перемещались грузовые вагоны на гужевой тяге. С появлением локомотивов (паровозов) довольно скоро стало очевидно, что рельсы из чугуна не обладают механическими характеристиками, необходимыми для безопасного движения по ним поездов на локомотивной тяге.

К середине 1800-х годов предпочтительным материалом для изготовления рельсов стал прокатный или ковкий чугун. Рельсы из ковкого чугуна постепенно заменялись стальными рельсами, которые прошли долгий путь эволюции, стали изготавливаться из более прочной рельсовой стали и в конце концов приобрели современный вид. Однако в последнее время ввод в обращение высокоскоростных пассажирских и тяжеловесных грузовых поездов ставит перед железными дорогами новые проблемы.

Нагрузки, оказываемые на рельсы современным подвижным составом, очень велики, что приводит к появлению относительно новых видов износа и дефектов, таких, как проявления контактной усталости качения и тонкие внутренние трещины. Поэтому необходима рельсовая сталь новых марок, которая

обеспечила бы лучшую работу рельсов в пути по сравнению с тем, что имеет место сегодня.

За последние 20 лет была создана рельсовая сталь разных марок, имеющая повышенную сопротивляемость износу и дефектообразованию. Наилучшую сопротивляемость современным механизмам износа демонстрируют рельсы из бейнитной стали.

Чугунные рельсы

Первые рельсы, изготавливаемые из чугуна, имели различное сечение и небольшую длину. Во второй половине 1700-х и в первой половине 1800-х годов такие короткие рельсы укладывали на каменные опоры. Железнодорожное полотно служило тогда для передвижения вагонов, в которых грузы перевозились на небольшие расстояния. Форма и геометрические параметры рельсов постепенно изменялись. На рис. 1 представлена эволюция рельсов в данном аспекте.

По появлению паровых локомотивов прочность чугунных рельсов стала недостаточной для увеличившихся нагрузок. Поиски более прочного материала привели к первому серьезному прогрессу в области металлических рельсов — с использованием в качестве заготовок небольших чугунных чушек рель-

сы стали изготавливать из прокатного или ковкого чугуна. Ковкий чугун — металл относительно мягкий, но вязкий, что связано с наличием прожилок шлака, тянущихся в продольном направлении. Шлак предотвращает развитие трещин и в отличие от чугуна, как такового, не подвержен хрупкому разрушению. Применение рельсов из ковкого чугуна продолжалось до конца 1880-х годов, когда появились экономически конкурентоспособные стальные рельсы.

Стальные рельсы

В середине 1800-х годов были получены первые образцы так называемой бессемеровской стали, использовавшейся преимущественно для изготовления ружейных стволов. Применение бессемеровской стали для изготовления рельсов сначала ограничивалось ее высокой стоимостью и нехваткой подходящего сырья — процесс выплавки такой стали требует железной руды высокого качества с малым содержанием серы и фосфора. Бессемеровская сталь превратилась в основной материал для изготовления рельсов лишь к концу 1800-х годов, когда был разработан способ плавления стали в мартеновских печах. Хотя этот процесс требовал относительно большого времени, он был более гибок и позволял как получать металл с нужными свойствами, так и снизить стоимость производства изделий из качественной стали, в том числе рельсов.

Мартеновский процесс оставался основной технологией выплавки стали до 1970-х годов и продолжает до сих пор использоваться некоторыми изготовителями. Ему на смену пришла технология непрерывного литья стальных заготовок взамен литья слитками. Получаемые в результате непрерывного литья блюмы не имеют свойственных слиткам недостатков, таких, как наличие неметаллических включений

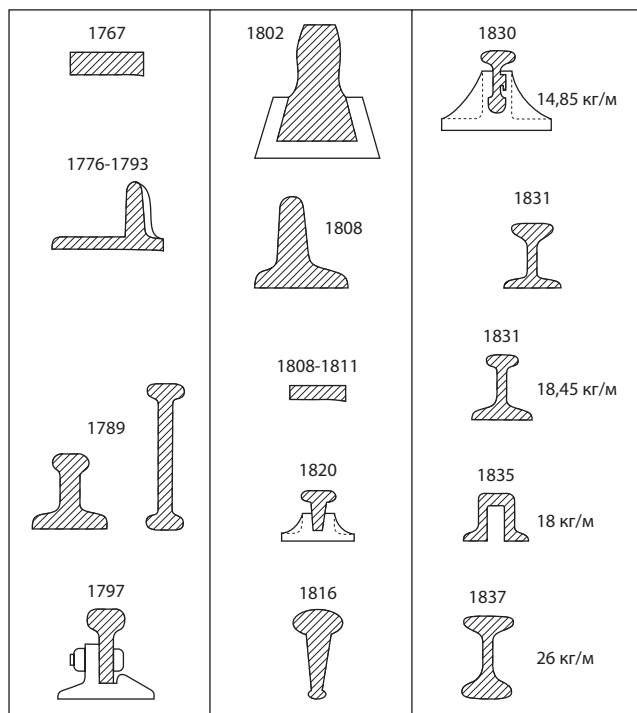


Рис. 1. Изменение формы и геометрических параметров чугуных рельсов (источник: компания Sperry Rail Service)

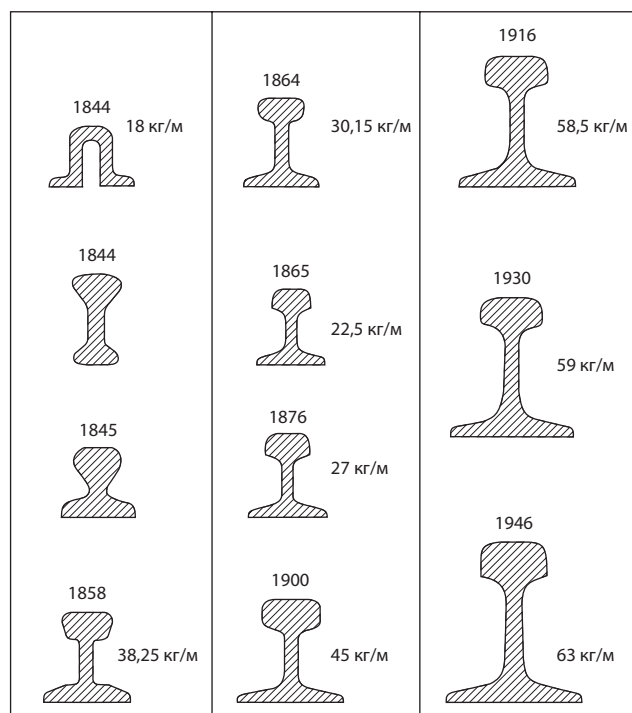


Рис. 2. Изменение формы и геометрических параметров стальных рельсов (источник: компания Sperry Rail Service)

(шлаков), газовых полостей и усадочных пустот. В рельсах эти производственные дефекты проявляются в виде вертикальных трещин в головке, сеток мелких трещин и усадочных раковин.

Современные высококачественные рельсы изготавливаются на рельсопрокатных станах, где используется технология непосредственной кислородной конверсии расплавленного чугуна в сталь. При этом металл очищается, в нем уменьшается содержание неметаллических включений. Применяется также вакуумирование для регулирования содержания водорода и кислорода.

Эволюция стальных рельсов представлена на рис. 2.

Прогресс в технологии изготовления стали

В рельсах, как и в других изделиях из стали, со временем возникают серьезные проблемы, связанные с обеспечением качества металла

при его выплавке. Бессемеровский и применявшийся в течение относительно короткого времени кислородный мартеновский процессы позволяли получать только сталь с относительно высоким содержанием фосфора и серы. Эта сталь была прочной, но хрупкой и не подходила для изготовления хороших рельсов. Вначале проблему решали путем применения в бессемеровском процессе сырья с низким содержанием фосфора и замены используемых в футеровке мартеновских печей основных материалов на кислотные, что химически уменьшало содержание фосфора.

С самого начала стало очевидно, что производственные дефекты, такие, как включения шлака и пустоты газообразования или усадки, значительно сокращают срок службы рельсов. Чтобы уменьшить число рельсов с такими дефектами, железные дороги предъявили изготовителям требование об отсутствии во вновь поставляемых рельсах включений шлака и раковин.

Тем не менее, поскольку эти дефекты являются внутренними и редко видны невооруженным глазом, их было трудно обнаружить в новых рельсах. К тому же до 1970-х годов ультразвуковой контроль рельсов в процессе их изготовления не осуществлялся. Дефекты обнаруживались лишь в процессе эксплуатации рельсов, зачастую через много лет. Нередки случаи, когда рельсы с такими дефектами служили до 20, а то и до 40 лет (в зависимости от объема движения и нагрузок). На большинстве металлургических комбинатов в настоящее время эту производственную проблему решают путем очистки металла в процессе литья и ультразвукового обследования каждого рельса перед его отправкой потребителю.

Газовые включения

У изготовителей рельсов и, следовательно, у железных дорог есть еще одна проблема — наличие в

Таблица 1

Характерный химический состав рельсового металла

| Годы | Содержание элементов, % | | | Способ выплавки металла |
|-----------|-------------------------|---------------|---------------|--|
| | углерода | марганца | фосфора/серы | |
| 1761–1840 | Примерно 3,5 | Примерно 0,70 | 0,8/0,15 | Чугунное литье |
| 1841–1890 | Примерно 0,08 | Примерно 0,06 | 0,15/0,20 | Чугун и 1–3% шлака |
| 1857 | Примерно 0,25 | Примерно 0,60 | 0,10/0,10 | Бессемеровский |
| 1880 | Примерно 0,30 | Примерно 0,90 | | |
| 1910 | 0,50–0,60 | 0,90–1,20 | Менее 0,5/0,5 | Мартеновский |
| 1928 | 0,60–0,70 | 0,60–0,90 | | |
| 1978 | 0,65–0,82 | 0,70–1,25 | | |
| | | | | Непосредственная кислородная конверсия/непрерывное литье |

стали включений газа (водорода). В рельсах эти включения проявляются в виде так называемого дефекта мелких поперечных трещин. Эти малозаметные дефекты развиваются и растут, приводя к катастрофическому снижению несущей способности рельсов, и часто являются причиной серьезных аварий, вплоть до схода подвижного состава с рельсов. После одного из таких инцидентов в США было проведено комплексное изучение его причин, составлена и осуществлена программа научных исследований, направленных на предотвращение таких дефектов. В результате был разработан метод контроля за охлаждением рельсов после их прокатки. При малой скорости охлаждения водороду хватает времени для диффузии из стали, и это предотвращает развитие в рельсах поперечных трещин. Эта технология применяется и в настоящее время, однако она постепенно вытесняется вакуумированием с регулированием содержания в стали водорода и кислорода.

Характерные примеры химического состава рельсового металла представлены в табл. 1, его механические характеристики – в табл. 2. Видно, что с течением времени процентное содержание основных легирующих элементов – углерода и марганца увеличивалось. Это позволило повысить прочность и твердость рельсов и, соответствен-

Таблица 2

Типичные механические характеристики рельсового металла

| Годы | Параметр | | | |
|-----------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| | Прочность на растяжение, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % | Поверхностная твердость по Бринеллю |
| 1761–1840 | Примерно 180–300 | – | Менее 1 | Примерно 170–260 |
| 1841–1890 | Примерно 300 | Примерно 200 | Примерно 18 | Примерно 200–220 |
| 1857 | Примерно 350 | Примерно 230 | Примерно 20 | Примерно 200 |
| 1880 | Примерно 500 | Примерно 280 | | Примерно 210 |
| 1910 | 600 | 400 | 17 | 220 |
| 1928 | 700 | 450 | 15 | 230 |
| 1978 | 900/1200* | 480/800* | 12/10* | 270/370* |

*Для термообработанных рельсов.

но, уменьшить их износ. К сожалению, повышение прочности и твердости происходит за счет снижения вязкости, что вынуждает железнодорожные компании решать сложные эксплуатационные проблемы, которые связаны с этим фактором.

Условия эксплуатации и дефекты рельсов

Современные пассажирские поезда на железных дорогах многих стран движутся со скоростью, достигающей 350 км/ч. Тяжеловесные поезда с углем и рудой имеют

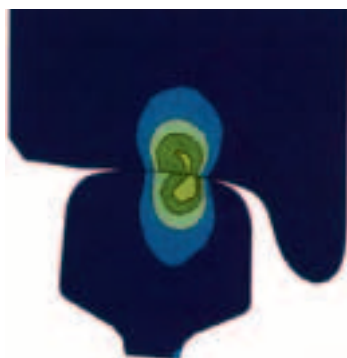


Рис. 3. Эпюра контактных напряжений в прямой

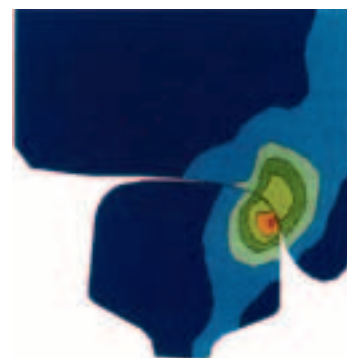


Рис. 4. Эпюра контактных напряжений в кривой



Рис. 5. Полоса контакта на поверхности катания рельса в прямой



Рис. 6. Полоса контакта на поверхности катания рельса в кривой

длину до 2 км и формируются из вагонов с осевой нагрузкой до 40 т. Такие поезда движутся по рельсам, сваренным в длинные плети, и в местах контакта колес с рельсами возникают напряжения, достигающие критических величин.

Поверхность единичного контакта между колесом и рельсом имеет площадь, эквивалентную кругу диаметром около 30 мм. На рис. 3 и 4 показаны характерные эпюры напряжений в зоне контакта на прямом и криволинейном участках пути. На рис. 5 и 6 представлены полосы контакта колеса с прямыми и криволинейными рельсами. На криволинейном рельсе видны проявления контактной усталости качения.

Очевидно, напряжения в контакте колеса с рельсом на криволинейном участке пути значительно выше, чем на прямом. Поэтому железные дороги обычно заказывают для участков пути с кривыми радиусом не более 1000 м рельсы с термообработанной (закаленной) головкой.

В настоящее время значимой для железных дорог проблемой являются значительные расходы, связанные с заменой и регулярным шлифованием рельсов вследствие следующих дефектов:

- внутренних дефектов производственного происхождения (рис. 7 и 8);
- контактно-усталостных дефектов качения (рис. 9);
- внутренних трещин;

- волнообразного износа рельсов (рис. 10);
- дефектов сварных рельсовых стыков (рис. 11).

Наиболее эффективным мероприятием в ходе текущего содержания пути, позволяющим устранить эти неблагоприятные факторы состояния рельсов (за исключением внутренних дефектов), является шлифование. Однако для операторов, эксплуатирующих линии с высокой плотностью движения поездов, выполнение соответствующих работ равносильно созданию затора, поскольку скорость движения рельсошлифовальных машин, как правило, не превышает 10 км/ч.

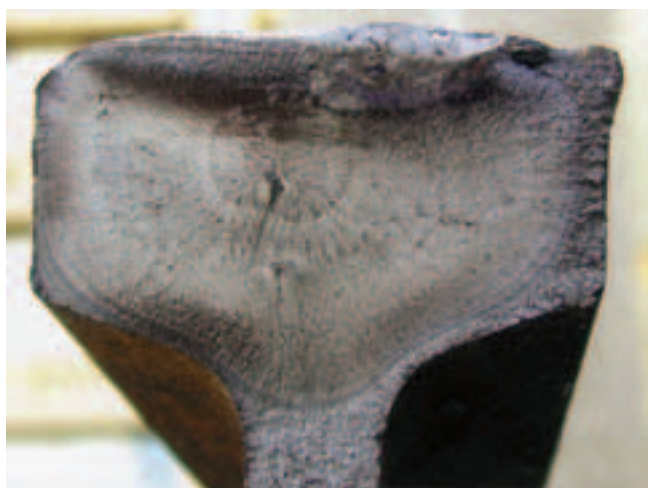


Рис. 7. Поперечная трещина в рельсе из-за шлакового (оксидного) включения



Рис. 8. Вертикальная трещина в головке рельса из-за шлакового включения

Для линий, на которых обращаются пассажирские поезда со скоростью до 350 км/ч и грузовые со скоростью до 130 км/ч, каждый проход рельсошлифовальной машины требует прекращения движения поездов на определенное время. Из-за этого объем рельсошлифовальных работ зачастую сокращают, и в некоторых случаях полностью устранить даже поверхностные дефекты рельсов не удается. Если состояние рельсов становится угрожающим, единственным выходом является их замена; это относится и к случаям обнаружения внутренних дефектов.

Наиболее опасными из указанных выше являются контактно-усталостные дефекты качения и тонкие внутренние трещины. Эти дефекты склонны распространяться в глубь металла, и их интенсивное развитие может привести к возникновению глубоких поперечных трещин и к полной потере рельсом несущей способности. Обычные методы ультразвукового обследования не очень эффективны для обнаружения внутренних дефектов, поскольку снаружи зачастую все выглядит хорошо. При таком обследовании расположенная ниже и более опасная трещина может оказаться необнаруженной, если она «закрыта» поверхностной трещиной.

Мировой опыт говорит о том, что чаще всего разрушение рельсов происходит именно по причине контактно-усталостных дефектов, и во многих случаях это влечет весьма серьезные последствия. Самой известной из подобных аварий был сход скоростного пассажирского поезда с рельсов в Хатфилде (Великобритания) в 2000 г. В ходе расследования было выявлено, что сход произошел вследствие катастрофического разрушения рельса из-за контактно-усталостного дефекта — на длине 35 м рельс раскололся приблизительно на 200 частей.

Новшества в области рельсовой стали

Чтобы избежать рельсы от указанных дефектов, железные дороги, не отказываясь от шлифования рельсов в качестве профилактической меры, применяют рельсы из стали новых марок, в которой предотвращается возникновение или замедляется развитие дефектов.

Углеродисто-марганцовистая легированная сталь, к которой железные дороги благосклонно относились в течение 140 лет, через неко-



Рис. 9. Дефекты контактно-усталостного происхождения в виде отслаивания металла



Рис. 10. Рельс с волнообразным износом

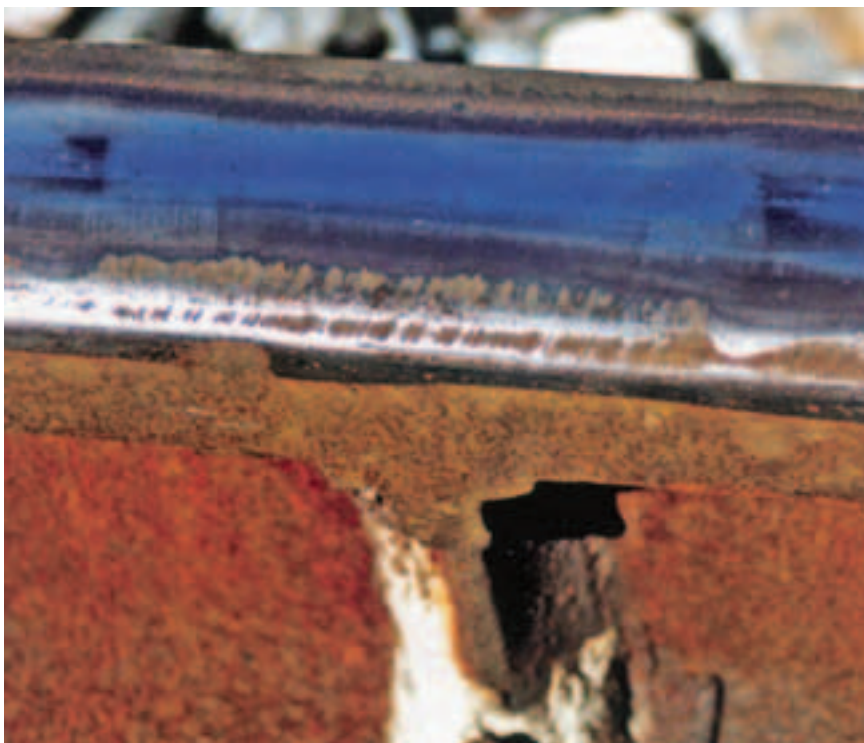


Рис. 11. Дефектный сварной рельсовый стык

торое время может быть заменена сталью новых марок, разрабатываемых научно-исследовательскими центрами и предприятиями металлургической промышленности в целях удовлетворения текущих и перспективных потребностей железных дорог.

В конце 1980-х годов была разработана рельсовая сталь, содержащая 1% хрома. Рельсы, изготовленные из этой стали, положительно проявили себя в отношении контактно-усталостных дефектов, но их оказалось трудно сваривать в плети бесстыкового пути контактной стыковой сваркой с оплавлением или алюмотермитной сваркой. Затем, в начале 1990-х годов, появилась заэвтектоидная (более 0,8% углерода) углеродисто-марганцовистая рельсовая сталь. Рельсы из этой стали также продемонстрировали сопротивляемость возникновению контактно-усталостных дефектов, но не исключали его полностью. Кроме того, имело место соответствующее уменьшение прочности, что вело к повышенному износу, в особенности при использовании таких рельсов на линиях с высокими осевыми нагрузками.

В конце 1990-х годов железные дороги Западной Европы и США совместно с институтами и предприятиями металлургической промышленности создали несколько марок бейнитной стали, пригодной для изготовления термообработанных рельсов. В настоящее время рельсы, изготовленные из этой стали, проходят испытания в условиях реальной эксплуатации.

Первые результаты испытаний свидетельствуют, что рельсы из бейнитной стали действительно об-

ладают повышенной сопротивляемостью возникновению и развитию контактно-усталостных дефектов и тонких внутренних трещин. Однако рельсы из бейнитной стали некоторых марок характеризуются более интенсивным износом, чем широко применяемые в настоящее время термообработанные рельсы из углеродисто-марганцовистой стали. Это говорит о том, что, прежде чем стать реальной альтернативой углеродисто-марганцовистой рельсовой стали с термообработкой, бейнитная рельсовая сталь должна пройти дополнительные исследования.

Примерно в это же время металлургической промышленностью Европы была разработана пригодная для термообработки микрولةгированная рельсовая сталь, продемонстрировавшая высокую сопротивляемость возникновению контактно-усталостных дефектов. Рельсы, изготовленные из такой стали, проходят испытание на высокоскоростных линиях Европы и на грузовых линиях Австралии с высокими осевыми нагрузками. В рельсах из этой стали при использовании на высокоскоростных линиях контактно-усталостные дефекты и мелкие внутренние трещины практически не возникают. Что касается ее способности сопротивляться образованию таких дефектов при использовании на линиях с большими осевыми нагрузками, здесь результаты испытаний неоднозначны.

Заключение

На предыдущих этапах развития железнодорожной техники в металлургии был внедрен ряд технологических новшеств, приведших к зна-

чительному улучшению эксплуатационных характеристик рельсов. В последнее время технический прогресс в данной области несколько замедлился и заметного улучшения состояния рельсов не наблюдается.

Вместе с тем недавно созданная рельсовая сталь определенных марок в сочетании со шлифованием позволяет держать под контролем развитие контактно-усталостных дефектов и отказаться от дорогостоящей замены рельсов как элемента системы текущего содержания пути.

Поставщики металлургической продукции и железные дороги решают трудную задачу создания рельсовой стали, которая не имела бы дефектов изготовления, связанных с посторонними включениями, обладала высокой прочностью, малой истираемостью и хорошей свариваемостью. Эти характеристики рельсов необходимы для обеспечения должного уровня безопасности при движении по ним как высокоскоростных пассажирских, так и тяжеловесных грузовых поездов будущего с большими осевыми нагрузками.

Полагают все же, что рельсы из бейнитной стали станут достойной альтернативой термообработанным рельсам из углеродисто-марганцовистой стали. После дополнительных исследований и испытаний бейнитную сталь можно будет использовать для изготовления рельсов, имеющих лучшие эксплуатационные характеристики, чем рельсы, применяемые в настоящее время.

I. Marks. Permanent Way Institution, 2007, № 2, p. 63–66.