

Рельсы из бейнитной стали на железных дорогах Швейцарии

При прохождении подвижного состава по рельсам на них воздействуют повторяющиеся нагрузки, в результате чего на поверхности катания рельсов образуются дефекты. Эти поверхностные дефекты чаще всего вызываются явлениями усталостного характера при контакте качения (RCF). Типичными усталостными повреждениями рельсов являются трещины и выкрашивания на выкружке рабочей грани (такое трещинообразование возникает в основном у наружных рельсов кривых малого радиуса в виде регулярно или случайно расположенных мелких трещинок), а также трещины и местные обжатия (дефекты № 2201 и 2202) на поверхности катания (они часто возникают в местах электрической или термитной сварки рельсов, а также в зонах их волнообразного износа).

Дефекты, обусловленные усталостью при контакте качения, зачастую приводят к излому рельсов, в результате чего происходят крушения поездов с тяжелыми последствиями. Компании — изготовители рельсов применили новые решения в разработке сталей, обеспечивающих устойчивость поверхности катания рельсов как к износу, так и к усталостным повреждениям.

Так, компания Corus Rail провела исследования, которые были направлены прежде всего на получение рельсовой стали бейнитной структуры в процессе охлаждения рельсов во время их выдержки.

Металлурги компании разработали сталь с малым содержанием углерода, химический состав которой обеспечивает преобразование ее структуры в бейнитную при естественном охлаждении по всему поперечному сечению рельсов. По этому образцу было освоено изготовление стали двух марок: V320 и V360.

Путевое хозяйство железных дорог Швейцарии

Сеть магистральных линий Федеральных железных дорог Швейцарии (SBB) имеет протяженность

порядка 5000 км и характеризуется сложным планом и профилем с большим числом кривых малого радиуса и уклонов большой крутизны. Об этом свидетельствуют следующие показатели:

- расположение 750 км путей (15%) в кривых радиусом менее 500 м и 1000 км путей (18%) — в кривых радиусом от 500 до 1500 м;
- наличие уклонов крутизной более 25‰;
- средняя грузонапряженность по сети в 2009 г. — 41 тыс. т брутто в сутки, или более 15 млн т брутто в год;

• преобладание смешанного движения с большим разнообразием типов используемых локомотивов и вагонов.

К этому следует добавить, что SBB находятся в числе железных дорог мира с самой высокой интенсивностью движения поездов.

Приведенные данные позволяют заключить, что рельсы на путях SBB подвержены высоким нагрузкам, в том числе усталостным. Это подтверждает статистика роста числа дефектов рельсов в виде трещин и местных обжатий (рис. 1). На эти дефекты приходится более 50% всех зарегистрированных повреждений рельсов.

В настоящее время практически все железные дороги не видят другой возможности устранения этих дефектов, кроме шлифования рельсов. Действительно, шлифование в определенной мере дает возможность улучшить состояние рельсов. Так, шлифование в кривых особенно эффективно с точки зрения устранения трещин и выкрашивания рельсов и позволяет

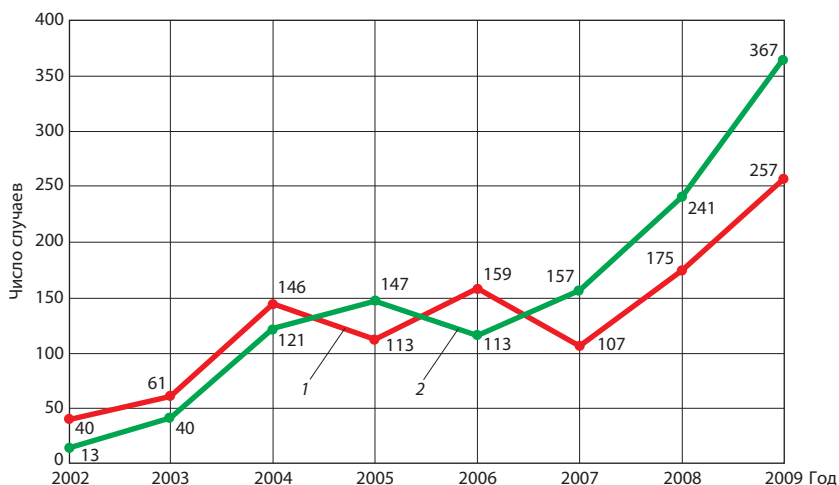


Рис. 1. Изменение числа дефектов рельсов в виде трещин и местных обжатий: 1 — число трещин; 2 — число обжатий

Таблица 1

Химический состав стали марки В360

Элемент	Углерод (С)	Марганец (Mn)	Кремний (Si)	Хром (Cr)	Молибден (Mo)	Титан (Ti)
Содержание, %	0,25–0,35	1,4–1,7	1,0–1,5	0,3–0,7	0,1–0,22	0,025–0,05

перепрофилировать головку рельса таким образом, что зона контакта с колесом возвращается в середину поверхности катания. В то же время большое разнообразие типов путевой структуры препятствует созданию единой системы шлифования рельсов, которую можно было бы повсеместно применять в целях борьбы с усталостными повреждениями поверхности катания.

Актуальность новых решений

Все это вынуждает к поиску иных путей ограничения повреждаемости поверхности катания рельсов, в том числе за счет применения рельсовой стали новых марок. (В этой связи следует отметить, что специалисты-путейцы SBB заинтересовались рельсами из бейнитной стали уже в конце 1990-х годов.)

Поскольку трещинообразование и выкрашивание рельсов имеют место, главным образом, в кривых,

именно на таких участках пути начали укладывать термически обработанные рельсы из стали марок R350 НТ и R350 ЛНТ.

При разработке бейнитной рельсовой стали марок В320 и В360 компания Cogus исходила из того, что по твердости и иным механическим характеристикам она должна быть как можно ближе к стали марок R350 НТ и R350 ЛНТ. Основные параметры бейнитной рельсовой стали марки В360 приведены в табл. 1 и 2.

Электрическое сопротивление стали марки В360 составляет 39,3 мкОм/см (для сравнения: у стали марки R260 этот показатель равен 26 мкОм/см, марки R360 — 33,0 мкОм/см).

Испытания

Результаты, полученные в ходе испытаний, которые начались в 1999 г. после укладки рельсов, изготовленных из стали марки В360, на

Таблица 2

Механические характеристики стали марки В360

Показатель	Гарантированная величина	Результаты испытаний
Твердость, НВ	340–390	363–375
Прочность на растяжение, МПа	> 1200	1227–1253
Предел текучести $R_{p0,2}$, МПа	> 780	869–941
Относительное удлинение, %	> 11	12,2–12,9
Прочность на излом, МПа·м ^{1/2} : ΔK = 10 ΔK = 13,5 усредненный K_{IC} при –20 °С		17 37 44
Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ м/(м·°С): при 20 °С при 60 °С		11,8–11,95 12,2–12,5
Усталостная прочность	Согласно стандарту EN 13674	

первом опытном полигоне вблизи станции Фрик (кантон Аргау), были весьма удовлетворительными. Через год было принято решение об укладке бейнитных рельсов, но от другого изготовителя, на другом опытном полигоне с целью расширения масштабов эксперимента, что и сделали в октябре 2000 г. К сожалению, после всего трех недель эксплуатации эти рельсы были сняты и заменены на обычные в соответствии с решением федеральной службы надзора на транспорте. В том же году бейнитные рельсы поставил еще один изготовитель, но они не были уложены из-за неблагоприятных результатов механических испытаний сварных рельсовых стыков.

Вместе с тем эксплуатация рельсов из бейнитной стали марки В360, уложенных на первом опытном полигоне, продолжается, и они демонстрируют отличные свойства в плане сопротивляемости возникновению и развитию усталостных повреждений поверхности катания.

Этот полигон находится на участке пути в кривой радиусом 449 м с грузонапряженностью от 82 тыс. до 84 тыс. т брутто в сутки. По этой линии осуществляется смешанное движение грузовых и пассажирских поездов со скоростью до 95 км/ч.

Испытания проводились в основном в четырех принципиальных аспектах, и их результаты можно резюмировать следующим образом.

Сопротивляемость рельсов из бейнитной стали марки В360 образованию трещин и выкрашиванию металла головки оказалась весьма высокой.

Износ рельсов из бейнитной стали определен как почти идентичный износу термообработанных рельсов из стали марки R350 ЛНТ. Следует отметить, что этот параметр изучался также и на других железных дорогах, где были уложены рельсы из бейнитной стали иных марок, однако там

результаты испытаний оказались не столь благоприятными, как на SBB. Общий вывод состоял в том, что сопротивляемость бейнитной стали боковому износу немного хуже, чем стали марки R260, а это расходится с данными испытаний рельсов из бейнитной стали марки V360 в Швейцарии. Швейцарские специалисты-путейцы, напротив, заключили, что рельсы из стали марки V360 не следует заменять по причине очень большого бокового износа и они могут оставаться в пути вплоть до наработки поездной нагрузки от 300 до 350 млн т брутто, что соответствует сроку службы всей путевой структуры до полной замены.

Подтвердился малый волнообразный износ рельсов из стали марки V360 на внутренней нити кривых радиусом от 450 до 600–650 м. Волнообразный износ является дефектом, который характеризуется псевдопериодической последовательностью своего появления на поверхности катания рельсов, и длина волны такого износа может находиться в пределах 3–8 см (такие волны считаются короткими) и 8–30 см (такие волны считаются длинными). В общем случае, если возникает волнообразный износ рельсов из обычной стали, колеса проходящих поездов как бы стучат по вершинам волн. При этом на вершинах волн происходит динамический наклеп, в результате чего рельсовая сталь меняет структуру на мартенситную, причем на поверхности рельсов появляются белые пятна. При большой длине этих пятен деградация рельсов ускоряется. Испытания рельсов из бейнитной стали марки V360 показали отсутствие белых пятен, что свидетельствует об их неоспоримом преимуществе с данной точки зрения. Вместе с тем волнообразный износ часто является причиной образования местных обжатий. У рельсов из бейнитной стали дефекты в виде местных обжатий и белых пятен не

наблюдались, несмотря на наличие волнообразного износа.

Особое внимание было уделено образованию углублений в зонах теплового воздействия, которое имеет место при сварке рельсов (причиной этого явления считают изменение качества металла в сварных рельсовых стыках). С целью облегчения сравнения рельсов из стали разных марок на обеих нитях одного из путей опытного полигона уложили плети длиной порядка 335 м, сваренные из рельсов из бейнитной стали марки V360 и термообработанных рельсов из стали марки R350 LHT.

Каждый отрезок плети длиной около 110 м состоял из рельса длиной 18 м из стали R350 LHT, рельса длиной 25 м из стали V360, рельса длиной 25 м из стали R350 LHT, рельса длиной 25 м из стали V360 и рельса длиной 18 м из стали R350 LHT, так что эти отрезки стыковались между собой по рельсам из стали R350 LHT в целях обеспечения однородности соединения отрезков методом термитной сварки (эта технология еще не до конца отработана для стали данной марки). Неоднородные соединения между рельсами из стали марок V360 и R350 LHT внутри отрезков были выполнены методом стыковой контактной сварки с использованием сварочного аппарата компании Schlatter, предоставленного железнодорожным техническим центром, расположенным в Хегендорфе.

В подверженных термическому воздействию зонах сварки на концах рельсов из бейнитной стали были обнаружены признаки образования углублений. Это стало следствием локального снижения твердости металла в данных местах. В условиях непрекращающегося движения поездов по этому пути оставлять сварные стыки в таком состоянии было нельзя, что потребовало их замены врезками рельсов из стали марки V360,

сваренными с применением метода термитной сварки.

Совместно с компанией Railtech были начаты исследования с целью решения проблемы сварки рельсов из бейнитной стали. Параллельно с этими исследованиями специалисты Федеральных железных дорог Швейцарии (SBB) продолжали изучать технологию стыковой контактной сварки на стационарной установке.

Чтобы считать результаты удовлетворительными, были поставлены следующие заранее определенные условия:

- образование бейнитной структуры по всему сечению сварного шва при сварке однородных (сталь марки V360) и разнородных (сталь марок V360 и R350 LHT) материалов;
- уменьшение разброса твердости металла в зоне сварки;
- предотвращение образования углублений;
- введение дополнительной термической обработки после сварки.

Эти исследования оказались результативными с точки зрения разработки состава алюминотермической смеси для сварки стали разных марок, а также технологии термической обработки сварных рельсовых стыков (сталь марки V360) после сварки. Специалисты компании Railtech разработали детальную методику сварки, включающую подготовку концов рельсов, а также определили параметры процесса и материалы для последующей обработки швов. Величины твердости концов рельсов в сварном стыке до и после термической обработки приведены на рис. 2.

Видно, что значения твердости после термической обработки имеют более регулярный характер и равны в среднем 375 НВ. Зоны, подвергнутые термической обработке, хорошо структурированы, и в таких сварных швах наблюдается хорошая сопротивляемость образованию углублений и других аномальных явлений.

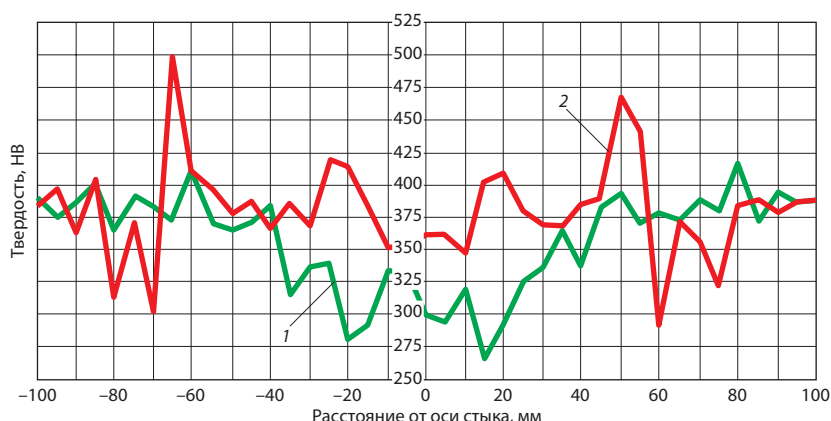


Рис. 2. Твердость концов рельсов в стыке, выполненном методом термитной сварки, до и после дополнительной термической обработки:
1 — до обработки; 2 — после обработки

Сварка рельсов из стали марок R350 LHT + V360

Как указано выше, несколько дефектных сварных стыков рельсов из стали разных марок, выполненных методом стыковой контактной сварки, были сняты с пути опытного полигона через 5 лет эксплуатации и заменены врезками рельсов из бейнитной стали марки V360, соединенными методом термитной сварки. Результаты анализа этих сварных стыков послужили базой для дальнейших исследований, направленных на совершенствование технологии сварки рельсовых стыков.

Исходные данные:

- выполнена термитная сварка без термической обработки;
- общая накопленная поездная нагрузка составила 106 млн т брутто;

- макроструктура сварного шва характеризовалась следующими параметрами: ширина расплавленного металла — 35–45 мм, ширина зоны термического воздействия — 36 мм со стороны рельса из стали марки V360 и 20–28 мм со стороны рельса из стали марки R350 LHT;

- длительность охлаждения составила 570 с.

Результаты анализа:

- сварные стыки после пропуска указанной поездной нагрузки не показали признаков деградации;
- структура сварного шва осталась стабильной;
- декомпенсация остаточного аустенита в головке рельса и в зонах термического воздействия отсутствует;
- остаточного аустенита на поверхности рельсов, упрочненных методом динамической накатки, когда композиция мартенсит +

Таблица 3

Ударная вязкость рельсовой стали в зоне сварки (по Шарпи)

Рельс	KV2, Дж	KCV, Дж/см ²
Из стали марки R350 LHT:		
по оси шва	5,5	6,9
в зоне высокотемпературного термического воздействия	9,5	11,9
в зоне низкотемпературного термического воздействия	8,5	10,6
основной металл	6,5	8,1
Из стали марки V360:		
по оси шва	11	13,8
в зоне высокотемпературного термического воздействия	8,5	10,6
в зоне низкотемпературного термического воздействия	23,5	29,4
основной металл	11,5	14,4

аустенит трансформируется в мартенсит, не обнаружено.

Таким образом, улучшение технологии контактной сварки, как показали многократные испытания, позволило получить параметры, соответствующие предъявляемым требованиям. Кроме того, удалось разработать процесс сварки с меньшим расходом энергии. Этот процесс получил название Narrow ZAT («узкая зона»), поскольку в ходе его осуществления достигается минимальная ширина зоны термического воздействия. Сварка по улучшенной технологии отвечает европейским нормам, а полученные сварные рельсовые стыки не нуждаются в последующей термической обработке. В табл. 3 приведены результаты испытаний сварных швов на ударную вязкость.

Следующий этап испытаний рельсов из бейнитной стали марки V360 начат в декабре 2008 г. и продолжается до настоящего времени. Его целью является исследование технико-эксплуатационных характеристик таких рельсов с другими профилями (в том числе типа 54 E2), в кривых других радиусов и с другими нагрузками на путь. Для этого рельсы уложили в кривых радиусом от 600 до 1200 м. На опытных участках, включающих кривые меньшего радиуса, было разрешено укладывать рельсы из бейнитной стали только на наружных нитях пути.

В табл. 4 приведены параметры опытных полигонов второго этапа испытаний.

Выводы

1. Технико-эксплуатационные характеристики термообработанных рельсов из стали марок R350 HT, 350 LHT и 370 LHT в условиях высоких нагрузок (кривые малого радиуса, крутые уклоны и большой пропускаемый тоннаж) можно считать весьма удовлетворительными.

Таблица 4

Параметры опытных полигонов второго этапа испытаний рельсов из бейнитной стали

Местоположение	Длина участка, м	Радиус кривых, м	Скорость движения поездов, км/ч	Место укладки рельсов	Грузонапряженность, тыс. т брутто/сут	Накопленная поезда нагрузка, млн т брутто
Сен-Пре	650	973–1000	140/160	Обе нити	66	26
Эффретикон – Кемпгаль	1100	600–760	До 115	Наружная нить	97	37
Ротенбург – Эмменбрюкке	473	896	До 90	То же	34	13
Эффинген – Кирхматт	585	446	До 90	»	76	29
Отмарзинген – Гекси	432	734	До 130	»	123	47

2. Применение рельсов из бейнитной стали марки В360 позволяет эффективно бороться с дефектами поверхности катания рельсов контактно-усталостного характера.

3. Использование рельсов из стали марки R260 дает удовлетворительные результаты при существующих нагрузках.

Здесь следует добавить, что если задача состоит прежде всего в борьбе с дефектами поверхности катания рельсов, обусловленными усталостью при контакте качения, то в этом плане рельсы из бейнитной стали марки В360 имеют неоспоримые достоинства:

- нет необходимости в поиске рельсов с другим профилем, например типа 60 E2, или с увеличенным с 13 до 16 мм радиусом рабочей выкружки для предотвращения выкрашивания рельсов;

- после укладки и первоначального шлифования рельсов из бейнитной стали отпадает необходимость в дальнейшем корректирующем или предупредительном их шлифовании для устранения или предотвращения возникновения усталостных дефектов поверхности катания, так как эти дефекты таким рельсам несвойственны;

- результаты механических испытаний бейнитной стали показали, что такие параметры, как ударная

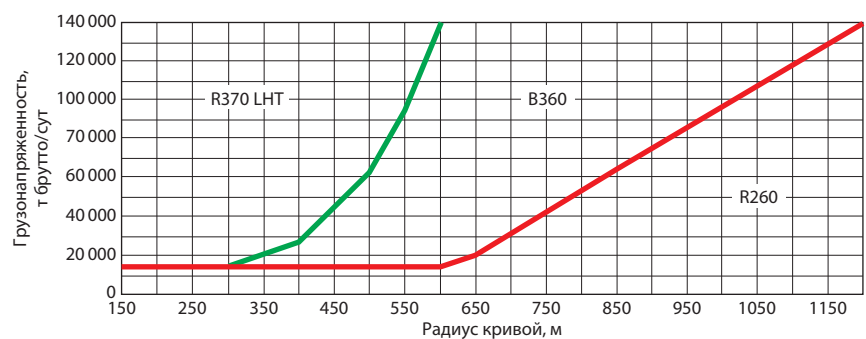


Рис. 3. Рекомендации по применению рельсов из стали разных марок на железных дорогах Швейцарии в зависимости от местных условий

вязкость, сопротивление разрыву и излому, у нее лучше, чем у перлитной стали, что указывает на более высокую устойчивость к большим динамическим деформациям. Это позволяет в течение более длительного времени наблюдать за реальными дефектами в рельсах из бейнитной стали, поскольку их развитие происходит в 2,7 раза медленнее, чем в рельсах из перлитной стали. При этом такие дефекты легче идентифицировать и своевременно устранить;

- даже при одинаковых механических характеристиках рельсы из бейнитной стали менее чувствительны к внутренним концентраторам напряжений.

На основании результатов проведенных исследований, а также стендовых и линейных испытаний

предложены рекомендации по применению рельсов из стали разных марок. Конечно, в зависимости от стратегии, выбранной железными дорогами той или иной страны, можно использовать термообработанные рельсы из стали одной или двух марок, но исходя из сложных условий работы железных дорог Швейцарии для решения существующих проблем здесь целесообразно применение рельсов из стали трех марок, как это показано на рис. 3. Такие рельсы полностью отвечают предъявляемым требованиям.

R. Némethy. Revue Générale des Chemins de Fer, 2010, № 196, p. 33–40; R. Némethy. L'utilisation des rails en acier bainitique en Suisse (материалы 7-й международной конференции VTM 2009, Париж; www.systra.com).