

# Выбор стали для колес — альтернативы и возможности

**С увеличением массы поездов и ростом интенсивности движения значительно увеличиваются нагрузки на колеса и рельсы. Так, у колес моторных осей современного пригородного подвижного состава повреждения поверхностей катания возникают уже после сравнительно небольшого срока эксплуатации. Особое значение на высокоскоростном подвижном составе придается проблеме полигонизации колес, т. е. возникновению некруглости, стремящейся к многоугольнику. Дорогостоящая обточка колес, связанная с уменьшением их диаметра, нередко производится не только на поврежденных колесах, но и на всех остальных с целью согласования их диаметров. В связи с этим вновь и вновь встает вопрос о выборе такого материала для колес, который может дольше выдерживать современные нагрузки.**

**Технический центр железных дорог Германии (DBAG) провел испытания новых колесных сталей. Для высокоскоростного подвижного состава испытывалась колесная сталь японского производства. Для пассажирских поездов, идущих со скоростью до 160 км/ч, исследовали возможность применения бейнитного чугуна (ADI), а также колесных сталей с повышенной устойчивостью к термическим нагрузкам. Проведенные стендовые и эксплуатационные испытания показали, что интенсивность возникновения некруглости может быть уменьшена, а пробег колес значительно увеличен за счет улучшения микроструктуры материала и обеспечения большей равномерности механических свойств по кругу катания.**

В контакте колесо — рельс материал колеса испытывает наибольшие нагрузки. Здесь имеет место не только процесс чистого качения с передачей постоянных высоких вертикальной и горизонтальной нагрузок, которые приводят к возникновению больших касательных напряжений на поверхностях катания колеса и рельса. Дополнительно перемещения колеса относительно рельса вызывают проскальзывания в продольном и поперечном направлении. В связи с этим материал испытывает не только механические, но и термические нагрузки. При этом картина повреждений поверхностей катания рельсов и колес будет различной в связи с большим или меньшим суммарным воздействием ад-

гезионного износа, пластической деформации, контактной и термической усталости.

## Стандартные материалы

Учитывая механизм и характер нагрузок, в Германии, как, впрочем, и во всей Европе, для железнодорожных колес и рельсов в основном применяют нелегированные стали, перлитная (в основном) структура которых, содержащая включения пластинок цементита, гарантирует высокую сопротивляемость адгезионному износу. Кроме того, перлитная структура обеспечивает высокую устойчивость к термическим преобразованиям в эксплуатации. В частности, по этой

причине для изготовления колес не используют стали с улучшенной (в классическом смысле) микроструктурой, т. е. состоящей из отпущенного мартенсита.

Если документ МСЖД 812 – 3 предусматривает возможность использования для изготовления цельнокатаных колес семи сортов стали (с R1 по R3 и с R6 по R9), которые в основном различаются процентным содержанием углерода, видом термообработки и связанной с нею прочностью, то в европейский стандарт DIN EN13262 вошли только четыре сорта стали: с ER6 по ER9 (таблица). Это соответствует уровню техники в Европе, так как сталь R1 для колес грузовых вагонов вряд ли будет использоваться вместо стали R7, а стали марок R2 и R3 вообще на практике никогда не применялись.

Наибольшее распространение должна получить сталь R7. Она применяется для изготовления колес грузовых вагонов почти всех типов, а также большинства пассажирских. В обозначении марки стали используются буквы Т или Е (см. таблицу). Буква Т обозначает, что сталь должна применяться для бандажных колес, а буква Е — для цельнокатаных. В зависимости от этого выбирают вид термообработки стали. При этом речь идет не о классической термообработке, а лишь о тонкой перлитизации. Если колеса, изготовленные из стали R7, будут использоваться на подвижном составе с колодочными тормозами, в этом случае, кроме обычных механических требований к стали должны быть выполнены также и специальные — в отношении вязкости при разрушении ( $K_{IC}$ ). Обеспечение величины этого параметра, в соответствии с требованиями стандартов МСЖД и EN равной  $80 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ , при содержании углерода  $\geq 0,5\%$  и относительно небольшой величине зерен позволяет достичь высокой чистоты металла и оптимальной равномерности микроструктуры по окружности колеса. Поскольку вязкость в общем

Требования к сталям для цельнокатаных колес согласно стандартам МСЖД 812-3 и DIN EN 13262

Обозначение марки стали		Содержание углерода, %	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности при растяжении, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение при разрыве, %	Энергия удара при испытании на ударную вязкость, Дж	
МСЖД 812-3	EN 13262	МСЖД/EN	EN 13262	МСЖД/EN	МСЖД/EN	МСЖД 812-3, U-образный надраз (RT)	EN 13262, V-образный надраз (-20 °C)
R1 N	–	≤ 0,48	–	600 – 720	≥ 18	≥ 15	–
R2 N	–	≤ 0,58	–	700 – 840	≥ 14	≥ 10	–
R3 N	–	≤ 0,7	–	800 – 940	≥ 10	≥ 10	–
R6 T, E	ER6	≤ 0,48	≥ 500	780 – 900	≥ 15	≥ 15	≥ 12
R7 T, E	ER7	≤ 0,52	≥ 520	820 – 940	≥ 14	≥ 15	≥ 10
R8 T, E	ER8	≤ 0,56	≥ 540	860 – 980	≥ 13	≥ 15	≥ 10
R9 T, E	ER9	≤ 0,6	≥ 580	900 – 1050	≥ 12	≥ 10	≥ 8

случае повышается с уменьшением содержания углерода в стали и в связи с этим с понижением прочности, то колеса изготавливают из стали с пониженным содержанием углерода (< 0,5%) и прочностью, лежащей в нижнем поле допуска. При этом структура материала бандажа будет содержать кроме перлита также значительную часть доэвтектоидного феррита. Этим обеспечивается выполнение требований по величине вязкости, однако оно влечет за собой понижение износостойкости. Как показывает опыт железных дорог Германии (DBAG), снижение содержания свободного (доэвтектоидного) феррита до величины ≤ 10% обеспечивает значительное уменьшение износа по поверхности катания колеса.

Для колес локомотивов и моторных колесных пар моторвагонных поездов в основном применяют сталь R8. Сталь R9 для изготовления колес применяется редко, за исключением путевых машин и платформ для перевозки автопоездов (RoLa).

Для изготовления цельнокатаных колес в Европе в основном используется нелегированная сталь, содержащая 0,56% углерода. У таких колес прочность на растяжение в зоне гребня после мягкой перлитизации ограничивается величиной 820–980 МПа.

В то же время сталь марки 900A, используемая для изготовления

стандартных рельсов, имеет значительно более высокое содержание углерода, а именно 0,6–0,8%. Однако предел прочности на растяжение у этой стали не превышает 1050 Н/мм<sup>2</sup>, так как она применяется в своем натуральном виде, т. е. без мягкой перлитизации. Термообработка головок рельсов в принципе возможна, однако такие рельсы можно укладывать в кривые радиусом 600–700 м, чтобы износ наружного рельса был меньше.

### Повреждения поверхностей катания

С увеличением интенсивности движения износ поверхностей катания колес и рельсов значительно увеличивается. Повысилась тяговая и тормозная мощность локомотивов и моторвагонных поездов, а их устройства регулирования тяги, использующие в качестве параметра величину проскальзывания, создают все условия для того, чтобы длительная мощность и максимальная сила тяги передавались на пределе сцепления. Не последнюю роль в увеличении износа играет повышение скорости поездов и рост осевой нагрузки. Так, если у высокоскоростного поезда ICE2 максимальная скорость 280 км/ч, то у ICE3 она уже составляет 330 км/ч при одновременном удвоении ускорения при трогании (до величины

0,34 м/с<sup>2</sup>). Все эти факторы, естественно, влияют на срок службы подвижного состава.

Если еще 15 лет назад основным фактором, определявшим эксплуатационные расходы на обточку и даже замену колес, были обусловленные износом нарушения профиля, то в современных условиях, когда на пассажирском подвижном составе в основном произошел переход от колодочных тормозов к дисковым, на первое место вышли повреждения поверхности катания колес, вызванные усталостью металла при трении качения, часто сопровождающейся термической усталостью. Так, на поверхности катания колес, особенно моторных осей современного пригородного подвижного состава, уже после небольшого времени эксплуатации в зонах проскальзываний появляются обусловленные термической усталостью мелкие трещины. С течением времени в условиях интенсивной эксплуатации сетка таких трещин приводит к выкрашиванию металла.

Металлографические исследования зон такого выкрашивания показали, что в результате интенсивных проскальзываний материал колеса на глубину в несколько миллиметров превратился в мартенсит. Эти места на поверхности катания получили название «зоны локального отслоения» (singuläre Ablätterungen). Преобразование

микроструктуры на достаточно большую глубину при проскальзывании колес не является единственной причиной выкрашивания металла на значительной площади поверхности катания. Так, почти по всему кругу катания наблюдаются серьезные повреждения поверхности, которые обусловлены усталостью металла, вызванной трением качения. В процессе качения, происходящего в условиях большой частоты вращения колес, высоких вертикальных и горизонтальных нагрузок, возникает усталостный износ. Наиболее интенсивен этот износ на колесах уменьшенного диаметра, поскольку частота их вращения больше. При испытаниях в них были обнаружены значительные пластические деформации в вертикальном и горизонтальном направлении. Такие колеса, как правило, допускались к эксплуатации по нижнему разрешенному пределу прочности.

Если усталостные трещины трения качения образовывались под поверхностью катания, это было результатом смещения максимума напряжений сдвига под поверхность катания, ставшего причиной образования локальных дефектов в стали. Эти трещины обычно возникали в колесах пассажирских вагонов, движущихся с максимальной скоростью 160 км/ч и оборудованных дисковыми тормозами. Как правило, зарождаются эти трещины в зоне неметаллических включений. На сети DBAG контроль и устранение таких дефектов не являются проблемой, так как все пассажирские вагоны регулярно проходят ультразвуковые испытания на специальном стенде. Если такие испытания не проводить, возможны катастрофические последствия, так как трещины могут достичь наружной стороны бандажа. В результате этого может произойти его излом, вызванный сдвигом материала в поперечном направлении. При испытаниях в рамках допуска колес, предлагаемых новыми поставщиками, на DBAG особое внимание

уделяют выполнению требований в отношении чистоты стали.

Для колес высокоскоростных поездов и подвижного состава, используемого в диапазоне скорости до 200 км/ч, возникает проблема периодической полигонизации (polygon — многоугольник). Речь идет об изменениях радиуса колеса, чередующихся с определенным периодом по кругу катания. Образующийся многоугольник, к которому стремится круг катания, обычно имеет более чем пять сторон. Процесс полигонизации вызван местным износом поверхности катания, обусловленным динамическими эффектами (повышенная скорость в сочетании с локальным увеличением жесткости пути). Образовавшиеся периодические неровности вызывают повышение уровня динамических колебаний бандажа. В связи с этим возникает вопрос о том, в какой степени сохраняющаяся постоянная по кругу катания гомогенность материала в сочетании с повышенной износостойкостью может замедлить возникновение полигональной некруглости колеса.

Как локальные выкрашивания поверхности катания колеса, так и периодические некруглости вызывают колебания, передающиеся на кузов вагона и в значительной степени ухудшающие плавность хода. Одновременно они являются причиной повышенных динамических воздействий на подвижной состав и конструкцию пути. Кроме того, они способствуют повышению уровня шума от проходящего поезда. Дорогостоящую обточку колес, при которой значительно уменьшается их диаметр, проводят не только на поврежденном, но и на всех остальных колесах данной единицы подвижного состава, чтобы избежать большой разницы в диаметрах. При этом следует стремиться к тому, чтобы не повышался объем эксплуатационных расходов и не уменьшался ниже установленного предела срок службы колес. Следует также отметить, что в ряде

случаев при обточке снимают значительно больше металла, чем это требуется для устранения дефектов, возникших при естественном износе. В связи с этим вновь возникает вопрос о материале колес, который значительно дольше может выдерживать повышенные нагрузки. Для решения проблемы Технический центр DBAG провел в свое время исследование новых колесных сталей.

### Испытания новых колесных сталей

---

#### Концепция материала

Для высокоскоростных поездов испытывалась колесная сталь японского производства, которая уже много лет применяется в высокоскоростных поездах Shinkansen (далее — сталь Shinkansen). Речь идет о нелегированной стали, которая содержит 0,65–0,7% углерода и обычно применяется для изготовления рельсов. Эта сталь с пределом прочности на растяжение 1050 кН/мм<sup>2</sup> по верхнему пределу допусков сопоставима со сталью марки R9. Такие параметры, как относительное удлинение при разрыве, ударная вязкость образца с надрезом и вязкость при разрыве, соответствуют требованиям, предъявляемым не только к стали марки R9, но также к стали марок R8 и R7, несмотря на высокое содержание углерода. Это указывает в первую очередь на высокую чистоту металла и сравнительно мелкозернистую структуру, что было подтверждено разрушающими испытаниями. Особый интерес представляет высокая гомогенность структуры по всему кругу катания колеса.

Для пассажирского подвижного состава, выполняющего перевозки со скоростью до 160 км/ч, возможны различные концепции применяемых материалов. В ходе испытаний большое внимание было уделено исследованиям возможности использования бейнитного чугу-

на марки ADI (Austempered Ductile Iron — отпущенный, ковкий чугун) для изготовления колес. Этот материал обладает комбинацией таких качеств, как износостойкость и высокая усталостная прочность при повышенной (по сравнению с другими марками чугуна) ковкости. Важен также дополнительный эффект: шаровидный графит, содержащийся в структуре этого чугуна, в паре трения выполняет роль смазки, снижающей износ. Одновременно графитные включения чугуна ADI повышают в 3 раза (по сравнению со сталью) его демпфирующую способность. Благодаря этому колеса из бейнитного чугуна обладают пониженным шумоизлучением. Удачное сочетание металлографического состава материала и типа термообработки позволило добиться предела прочности на растяжение  $1000 \text{ Н/мм}^2$ . В ходе реализации проекта для проведения исследований была изготовлена опытная партия колес. Кроме обычных лабораторных исследований, посвященных определению состава и качества материала, особое внимание было уделено классическим испытаниям колес из чугуна ADI на разрыв. Трещины, возникающие при изготовлении колес, надежно обнаруживали методами неразрушающих испытаний. Результаты исследований, в частности, показали, что колеса из бейнитного чугуна ADI могут успешно эксплуатироваться в рамках системы технического обслуживания подвижного состава, действующей в сети DBAG.

Важным разделом исследований было испытание колесных сталей с улучшенной термостойкостью. Речь идет о низколегированных сталях марок S2 и S3, которые имеют пониженное (по сравнению со сталью R7) содержание углерода (от 0,4 до 0,45%). Сталь S2 имеет более низкую прочность, чем сталь S3. При этом суммарный диапазон прочности этих сталей полностью перекрывается прочностными характеристиками стали R7.

Вязкость стали S2 соответствует требованиям, предъявляемым в отношении этого параметра к стали R7, а величина вязкости стали S3 лежит в диапазоне нижнего предела допусков стали R8. Путем добавки легирующих элементов удалось добиться того, что перлитно-ферритная микроструктура стали при более высокой температуре имеет меньшую тенденцию к превращению в аустенитную. Благодаря этому при термических нагрузках, возникающих при проскальзывании или боксовании колеса, вероятность образования на поверхности катания хрупкого мартенсита уменьшается. Все эти материалы перед эксплуатационными испытаниями прошли специальный контроль на стенде системы колесо — рельс в Кирхмёзере. Здесь проверяли не только факт снижения тенденции нового колеса к полигонизации, но также и его реакцию на нагрузки, возникающие при боксовании и юзе. Большое внимание в ходе испытаний уделялось воздействию колес из новых материалов на рельсы в сравнении с колесами из обычной стали R7.

### Стендовые испытания

На испытательном стенде системы колесо — рельс моделировался в натуральном масштабе контакт качения колеса по рельсу. Речь идет о стенде, работающем по принципу колесо — ролик (рис. 1). Испытываемая колесная пара приводится во вращение парой роликов, объединенных жесткой осью и снабженных приводом. Ролики по кругу катания имеют профиль головки рельса. Они изготовлены из рельсовой стали марки 900A и имеют диаметр 2100 мм. Характер контакта колес и роликов соответствует принятому на железных дорогах Германии изношенному профилю.

Испытываемая колесная пара монтируется в специальной одноосной тележке и может быть разогнана до частоты вращения, соответствующей линейной скорости  $300 \text{ км/ч}$  при осевой нагрузке до 30 т. На стенде динамически регулируются режимы движения в кривых с разными углами набегания колес, а также моделируется выход из кривой на прямолинейный участок. Сценарии нагрузок выбирают таким образом, чтобы они были как

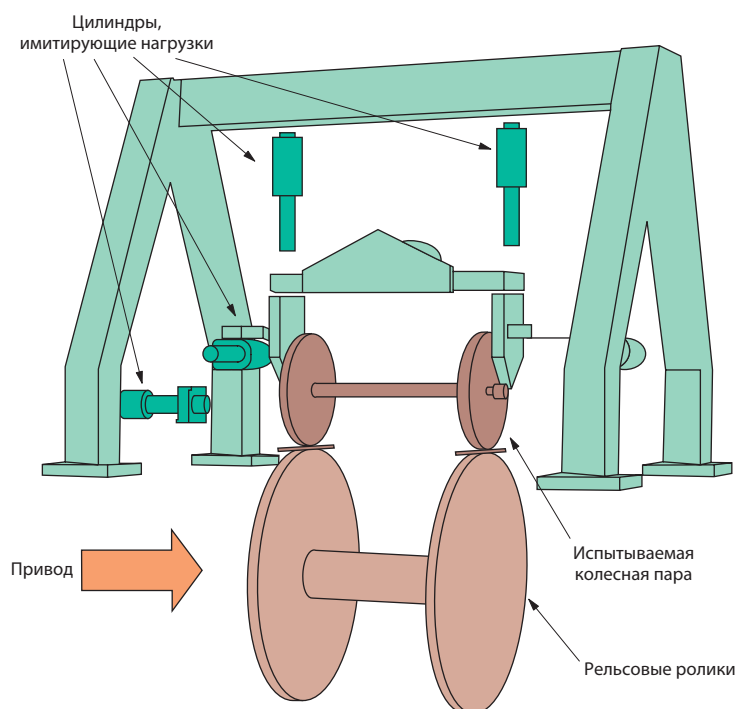


Рис. 1. Схема испытательного стенда колесо — рельс



можно ближе к эксплуатационным. При этом базируются на технических характеристиках подвижного состава, комбинациях кривых и прямолинейных участков, скоростном режиме, процессах торможения и погодных условиях. Если же требуется получить воспроизводимые результаты в течение короткого времени, то испытания следует вести со сверхпропорциональной имитацией критических эксплуатационных режимов, таких, как движение в кривых малого радиуса и экстренное торможение.

Первые результаты измерений продольных и поперечных профилей, а также неразрушающего контроля трещинообразования на поверхности катания в общем случае получают уже после пробега 6000–8000 км, который реализуется в течение четырех суток работы стенда. Стендовые испытания не только позволяют провести предварительные испытания быстрее и с меньшими затратами, но также дают возможность выяснить, в какой мере использование колес из новой износостойкой стали увеличивает износ рельсов. Этот аспект в программах испытаний новых материалов колес и рельсов, как правило, остается малоизученным, так как при испытаниях в эксплуатационных условиях получить достоверные данные об увеличении износа рельсов достаточно сложно. В рассматриваемом случае стендовые испытания новых материалов проводили в сравнении с обычной колесной сталью R7.

**Сравнение сталей Shinkansen и R7.** Испытания проводили при следующих условиях:

- средняя осевая нагрузка 13 т;
- движение по прямым и криволинейным участкам радиусом от 600 до 1800 м;
- скорость движения от 110 до 190 км/ч;
- лубрикация рельсов не используется;
- сокращение времени испытаний, если осевая нагрузка превышает 30 т, а боковое ускорение букс

больше, чем  $250 \text{ м/с}^2$  (последний параметр является мерой полигонизации колес);

- между первой и второй серией испытаний проводится обточка колес.

На рис. 2 показано, в какой мере тенденция к образованию некруглостей колес зависит от материала. Так, уже первая серия испытаний выявила, что сталь Shinkansen обеспечивает в 2,5 раза больший пробег до появления сравнимых некруглостей колес, чем сталь R7. После обточки колес со снятием слоя металла толщиной 2,5 мм колес из стали Shinkansen во второй серии испытаний обеспечили пробег 31 500 км, после чего испытания были прерваны, хотя поперечные силы и ускорения букс еще не достигли предельных значений. Проведенные испытания показали, что сталь с повышенным содержанием углерода и более высокой прочностью меньше подвержена износу, в результате чего интенсивность образования некруглостей колес значительно снижается. Это также свидетельствует о том, что в материале бандажа отсутствует свободный феррит. По завершении испытаний лишь на поверхности катания колес из стали R7 были обнаружены цепочки V-образных трещин.

Параллельно с испытаниями колес исследовали также изменение профиля рельсовых роликов. Такие испытания позволяют заблаговременно обнаружить и оценить возможное увеличение износа рельсов в случае использования ко-

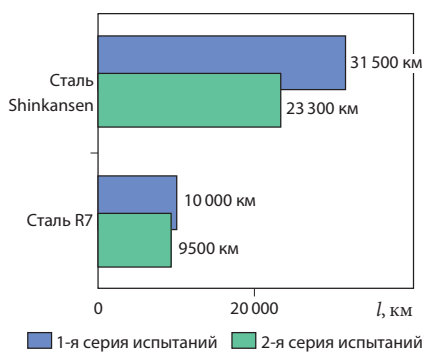


Рис. 2. Величина пробегов колес из сталей R7 и Shinkansen

лес из новых материалов. Соотношение износов колеса и рельса (в данном случае рельсового ролика) определяют с помощью оценки поперечных профилей бандажа и головки рельса до испытаний и после них, а также соотношения окружностей колеса и рельсового ролика. По величине соотношения износов определяют, в какой мере при каждом обороте расходуется материал колеса и рельса, насколько сильнее более твердое колесо изнашивает рельс или наоборот. Если соотношение равно единице, это значит, что колесо и рельс изнашиваются в равной мере. В рассматриваемом случае для колеса из стали Shinkansen и рельса соотношение износа колеса/рельс составило 0,86. Иными словами, здесь наблюдается тенденция к увеличению износа рельса.

При испытании колесной пары из стали R7 величину указанного соотношения определить не удалось из-за слишком большого разброса результатов. Дополнительные испытания на стенде должны внести ясность в эту проблему.

**Сравнение бейнитного чугуна ADI со сталью марки R7.** Испытания проводились при тех же условиях, что и в предыдущем случае.

Испытаниям на стенде колес из бейнитного чугуна ADI придавалось особое значение из-за особых свойств этого материала. В связи со смазывающим действием шаровидного графита, содержащегося в микроструктуре ADI и попадающего в контакт колеса с рельсом, сила трения снижается, и износ колеса и рельса становится значительно меньше. При испытаниях на стенде колесной пары из материала ADI был получен пробег более 50 тыс. км, после которого величина ускорения букс и поперечной силы так и не достигла критериев, требующих прерывания эксперимента. Здесь, однако, следует отметить, что при качении такой колесной пары по рельсам обычного пути эффект смазывания будет проявляться значительно в меньшей

степени, чем на рельсовых роликах стенда, развернутая длина каждого из которых равна 6,6 м.

По окончании испытаний при осмотре колес из бейнитного чугуна ADI на их поверхности катания не было обнаружено дефекта в виде цепочек V-образных трещин. Исследование профилей колеса и рельсового ролика показало, что после такого большого пробега износ фактически отсутствует как на колесе, так и на ролике.

После стендовых испытаний планировались эксплуатационные испытания колес из материала ADI под двухэтажным вагоном, используемым в региональных перевозках со скоростью до 160 км/ч. Когда колеса для этих испытаний были изготовлены, ультразвуковой контроль показал наличие в них внутренних дефектов. Они возникли в ободе и диске в процессе литья. В связи с этим от использования таких колес отказались.

**Сравнение сталей S2 и S3 со сталью R7.** Эти испытания также проводили в два этапа. Первый этап предусматривал движение в кривой (6000 км) для проверки склонности колес из указанных материалов к возникновению некруглостей при следующих условиях:

- средняя осевая нагрузка 116 кН;
- скорость от 50 до 120 км/ч;
- радиусы кривых от 300 до 1200 м;
- воздействие влаги.

При испытаниях на втором этапе планировалось моделировать движение по прямолинейному участку, в том числе с торможением (1900 км) для исследования склонности материалов к повышению твердости при боксовании. Для этого этапа предусматривались следующие условия:

- величина нагрузок и скорости, как на первом этапе;
- трехкратное остановочное торможение со скорости 200 км/ч;
- извилистое движение;

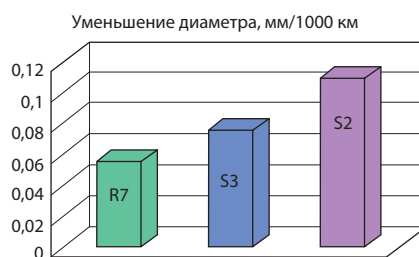


Рис. 3. Износ колес из сталей R7, S2 и S3 после первого этапа испытаний на стенде системы колесо — рельс

- воздействие влаги.

Результаты первого этапа испытаний показали, что колеса из сталей S2 и S3 имели больший износ с уменьшением диаметра, чем колеса из стали R7 (рис. 3). При этом колеса из стали S2 показали повышенную склонность к полигонизации в связи с относительно меньшей прочностью материала и высоким содержанием свободного феррита в его микроструктуре. В то же время стали R7 и S2 обнаружили лучшие и сравнительно близкие результаты.

После завершения второго этапа, при котором проверялось поведение материалов при воздействии нагрузок, связанных с боксованием, колеса из термически более стойких сталей S2 и S3 имели, как и ожидалось, меньший износ, чем колеса из стали R7. Следует, однако, отметить, что эта разница была сравнительно небольшой.

Поскольку в ходе стендовых испытаний особых преимуществ стали S2 и S3 перед традиционной сталью R7 обнаружено не было, то от эксплуатационных испытаний колес из этих легированных, а следовательно, и более дорогих сталей пришлось отказаться.

#### Эксплуатационные испытания

В 2003 г. начались эксплуатационные испытания под промежуточными вагонами высокоскоростных поездов семейства ICE колесных пар из стали Shinkansen.

Результаты испытания 45 таких колесных пар показали, что для них обточка колес требовалась значительно реже, чем для колес из стали R7. Для этого было выбрано по 40 колесных пар каждого вида. По результатам оценки сделан следующий вывод: большая часть колес из стали R7 при суммарном пробеге 240 тыс. км, т. е. еще до достижения пробега, при котором проводятся ультразвуковые испытания, подвергалась обточкам по разным незапланированным причинам (отклонения от стандартного профиля, некруглости, повреждения поверхности катания и др.). В то же время колеса из стали Shinkansen в основном достигли этого пробега без промежуточных обточек. Эти данные полностью подтвердили результаты испытаний на стенде колесо — рельс. Для фундаментального статистического подтверждения был запущен крупномасштабный проект эксплуатационных испытаний.

#### Выводы

Испытания новых колесных сталей, проведенные железными дорогами Германии, показали, что решающее значение для повышения качества колес имеют микроструктура стали и постоянство механических свойств по всему кругу катания. В основном эти параметры определяют интенсивность образования некруглостей колеса, решающим образом влияющих на плавность хода. Альтернативой применяемым в настоящее время материалам могут стать сталь Shinkansen и бейнитный чугун ADI, однако для их внедрения необходимы мероприятия, которые позволят добиться высокого качества изготовления колес.

K. Madler, M. Bannasch. *Glaser's Annalen*, 2006, № 10, S. 428–435.