

# Повышение надежности и срока службы колесных пар и рельсов

Эксплуатационные нагрузки колесных пар и рельсов определяют срок их службы. Для колес и осей колесных пар характерны усталостные разрушения. При всех усталостных нагрузках действует циклическое нагружение, включающее растягивающие напряжения. Последние являются основной причиной возникновения и распространения трещин в ободе колеса. Дефекты, характерные для колес, также свойственны и рельсам, но проявляются несколько иначе. В центре поверхности катания головки рельса они вызывают шелушивание металла, а на рабочей грани образуют сетку усталостных трещин.

## Характеристики колес, нагрузки и дефекты

Главной задачей при выборе материала железнодорожных колес является обеспечение оптимального срока службы и гарантия безопасности в отношении аварийных изломов. Как продолжительные эксплуатационные испытания, так и экспериментальные исследования показали, что срок службы колес можно увеличить, используя сорта стали с более высокими параметрами твердости и прочности, и что можно уменьшить опасность изломов, используя сорта стали с оптимальными характеристиками ударной вязкости. Поиск оптимального сочетания этих двух противоположных требований дал результаты, позволившие увеличить срок службы колес за счет постепенного повышения прочности углеродистой стали с 600 до 1000 МПа при одновременном сохранении высокой ударной вязкости. Последнюю стремились улучшить за счет легирования, но колеса из такой стали не оправдали ожиданий в отношении увеличения срока службы и экономической эффективности.

На следующем этапе поисков и разработок специалисты руководствовались распространенным мнением о том, что для железнодорожных колес оптимальной считается мелкозернистая углеродистая сталь с перлитной структурой и малыми промежутками между пластинками цементита. Такая микроструктура достигается ускоренным охлаждением обода колеса с последующим самоотпуском. Она соответствует требованиям износа и вязкости. В результате ускоренного охлаждения структура имеет качества метастабильной фазы в термодинамически равновесной системе железо — углерод (Fe — C). Выявленная неустойчивость данной структуры объясняется тем, что при движении экипажа, сопровождающемся повышением температуры в местах качения, пластинчатый цементит в результате диффузии сфероидизируется, превращаясь в глобулярный (зернистый) цементит, соответствующий стабильной фазе системы Fe — C.

*Дефекты в центральной области поверхности катания.* В центральной области конической поверхности катания колеса, где измеряют его диаметр (в зоне круга ката-

ния), возникают дефекты следующих трех типов:

- рифли на поверхности катания;
- некруглость колес;
- выкрашивание (отслаивание).

Указанные типы дефектов достаточно сложно объяснить на основе единственной общепризнанной теории контактной усталости качения. Большинство проблем, касающихся эксплуатации колесных пар, требуют исследования процессов выкрашивания поверхности катания колес.

Для исследования дефектов данного типа взяли шесть железнодорожных колес, к которым уже были предъявлены претензии. Выбрали по два колеса поездов трех серий: Euroment (диаметр колеса 920 мм, сорт стали B92), Desiro III (850 мм, сорт R8T) и Itino (770 мм, сорт R8T). Эти поезда оборудованы дисковыми тормозами, и поэтому тепловое воздействие тормозных колодок на поверхность катания исключалось. У пяти колес было выявлено выкрашивание, и только одно колесо было без видимых дефектов. Все колеса изготовлены на одном и том же заводе из стали четырех разных плавок. На момент приемки колес все технические параметры имели достаточный запас. У колес из стали сорта R8T и B92 требуемые механические показатели и химический состав достаточно близки, поэтому оба сорта оценивали как один. Пластические свойства колесной стали были высокими, и отношение предела текучести к пределу прочности составило 0,6. Содержание серы и фосфора было на 50% ниже, чем нормировалось

правилами приемки, что свидетельствовало о высокой чистоте колесной стали.

*Анализ дефектов выкрашивания.* Все колеса, к которым были предъявлены претензии, подверглись испытаниям с целью снятия механических характеристик в соответствии с техническими условиями сдачи/приемки. Определение механических показателей проводилось на образцах, вырезанных на глубине 15 мм под фактической поверхностью катания. У четырех из шести колес диаметр стал меньше в результате эксплуатационной обточке профиля. У обточенных колес предел прочности на растяжение снизился, поэтому образцы для испытаний вырезали с большей глубины. Проведенный анализ микроструктуры этих образцов показал наличие тонкой перлитной структуры со сфероидизацией пластинок цементита в диапазоне от 5 до 10%. На основе проведенных дополнительных испытаний также было доказано, что материал колес соответствует международным условиям сдачи/приемки.

Изучение характера дефектов показало, что сначала появляется единичный дефект на поверхности катания. Затем такой же дефект возникает под действием динамических ударов, происходящих с большой частотой. В результате подобные дефекты, располагающиеся с небольшим шагом, появляются по всей поверхности катания колеса.

Анализ дефектов выкрашивания, выполненный при исследовании продольного и поперечного сечений, доказал наличие трещин сдвига, направленных от середины поверхности катания не только в обе стороны по ходу экипажа, но и в поперечном направлении — к гребню бандажа и внешней поверхности обода. Углубления, образовавшиеся при выкрашивании, имели различную форму, поэтому можно сделать вывод о том, что направление развития трещин сдвига в дефектах выкрашивания имеет стохастический характер.

Металлографический анализ свидетельствовал о том, что сталь в зоне дефекта имела перлитную структуру со 100%-ной сфероидизацией.

По результатам измерения твердости по Бринеллю, выполненного в разных точках в пределах ширины поверхности катания, был сделан вывод о том, что в зоне круга катания твердость наименьшая, а к краям поверхности катания она увеличивается.

В настоящее время существует мнение, основанное на факте обладающего влиянием на трещинообразование контактной усталости при качении, что при воздействии колеблющегося усилия сжатия возникают так называемые циклическая пластичность и циклическая текучесть, обусловленные усталостными явлениями. Эти факторы являются причиной низкоциклической усталости, ведущей, прежде всего, к упрочнению материала и, соответственно, к снижению его пластических свойств. В результате этого зарождаются и развиваются трещины сдвига.

При анализе дефектов в средней части поверхности катания возникли расхождения с теорией усталости при качении (теория RCF) по ряду пунктов:

- из-за контакта колес с рельсами на поверхности действуют остаточные напряжения сжатия. Согласно теории механики разрушения остаточные напряжения сжатия должны снижать интенсивность зарождения и роста усталостных трещин;

- силы, действующие в пятне контакта, создают в местах соприкосновения так называемое гидростатическое давление. При таком всестороннем давлении пластические деформации должны ограничиваться. При этом также не должны возникать сдвиговые трещины;

- при исходной пластинчато-перлитной структуре стали имеет место лишь 10%-ная сфероидизация. В зоне дефекта речь идет уже о 100%-ной сфероидизации, при ко-

торой микроструктура имеет характер зернистого перлита. Сфероидизация используется при холодной обработке перлитной стали. Если пластические свойства стали исчезают в результате повышения твердости, их восстанавливают с помощью отжига на зернистый перлит. Отношение предела текучести к твердости у исследованных колес составило 0,6, что подтвердило наличие хороших первоначальных пластических качеств;

- в теории механики разрушения упоминаются три основных механизма возникновения трещин — под действием сил растяжения, сдвига и среза. Тем не менее результатами изучения микроструктуры металла в зоне выкрашиваний это не подтверждается;

- если всю поверхность катания оценивать согласно теории механики разрушения, то окажется, что зона круга катания обладает наилучшими условиями для предотвращения усталостных трещин. Однако в данной области возникают дефекты всех трех типов: рифли, некруглость и выкрашивание.

### Экспериментальные и эксплуатационные испытания

На испытательном участке Веллим (Чехия) Техническим университетом Остравы (VŠB) в сотрудничестве со специалистами металлургических компаний были выполнены исследования вибрации колес в различных режимах движения. С этой целью датчики располагали по диаметру колес с внутренней стороны. Были сняты спектры собственных частот и исследовано влияние на спектр величины амплитуд колебаний при разных значениях скорости движения, в том числе при использовании колодочного тормоза и без торможения, а также с гасителями колебаний и без них. Полученные результаты позволили определить собственную

частоту колебаний отдельных частей тележки.

В ходе эксперимента были выполнены измерения на тележках двух типов с разными характеристиками первичного рессорного подвешивания и, соответственно, разной жесткостью рессорных пружин.

Результаты измерений показали, что за счет упругости цилиндрических пружин в значительной степени снижаются динамические воздействия пути на тележку. Увеличение числа пружин до восьми на каждую колесную пару обеспечивало равномерное распределение вертикальных нагрузок, что благоприятно сказывалось на динамике тележки.

*Рифли на поверхности катания.* Спектральный анализ собственных частот, выполненный для колес нескольких типов, показал, что поперечные колебания имеют короткую длину волны, приблизительно соответствующую частоте более 350 Гц. При измерении в ходе эксплуатационных испытаний величин амплитуды колебаний оказалось, что она увеличивается пропорционально скорости движения и интенсивности колодочного торможения.

На величину амплитуд колебаний влияют форма и толщина поперечного сечения диска, поэтому не рекомендуется слишком уменьшать толщину колесного диска в целях снижения массы. Собственная частота колебаний является причиной возникновения рифлей на поверхности катания с шагом от 30 до 100 мм. При благоприятном напряженном состоянии, имеющем место в случае действия объемного или «гидростатического» давления, условия для возникновения трещин на поверхности катания отсутствуют. За счет пластических свойств стали и изгибных напряжений в местах контакта колеса с рельсом образуются вершины рифлей. При качении колеса контакт с рельсом осуществляется главным образом по этим вершинам, в результате чего

они приобретают вид светлых блестящих пятен небольшой величины. В связи с образованием рифлей увеличиваются динамические воздействия и возрастает уровень шума, что можно устранить только путем обточки колес.

*Некруглость колес.* В процессе эксплуатации возникает некруглость колес, вызванная появлением на поверхности катания от одной до четырех волн неровностей. Большие промежуточные расстояния между волнами соответствуют низким собственным частотам крутильных и изгибных колебаний осей колесных пар. Эти частоты ниже, чем у колес. Длина волн достаточно большая, поэтому контакт колеса с рельсом при качении осуществляется по всей окружности колеса.

Известно, что высокая неподдресоренная масса колесной пары ухудшает динамические свойства единицы подвижного состава. Поскольку возможность снижения массы колес и осей колесных пар ограничена, конструкторы не пытаются повысить динамическую жесткость осей колесных пар за счет увеличения их диаметра. Наиболее критический диаметр находится в подступичной части, т. е. в месте посадки колеса на ось. Здесь из-за воздействия фреттинг-коррозии существует большая опасность изломов.

Повысить предел выносливости подступичной части оси при изгибе можно путем повышения твердости и увеличения напряжений сжатия на посадочных поверхностях. Эта цель достигается с помощью механического и химического поверхностного упрочнения (накатка, закалка, науглероживание, азотирование и др.). Тем не менее ни один из названных технологических методов не повышает динамической изгибной жесткости осей колесных пар. Собственные частоты изгибных колебаний зависят от упругости оси в целом и от связанных с нею масс (тормозные диски, редуктор тяговой передачи).

Изгибные колебания оси передаются на поверхности катания колес. Чем ось «более гибкая», тем ниже собственная частота колебаний, а величина амплитуд колебаний нелинейно (в квадратичной зависимости) увеличивается. На амплитуды колебаний осей колесных пар также влияет величина динамической нагрузки на поверхность катания колес, проявляющейся в некруглости поверхности катания. В местах концентрации напряжений сначала происходит раскатывание шероховатости, а затем следует постепенное увеличение раскатанной площади и возрастает некруглость поверхности катания за счет текучести материала.

Если некруглость измерять через радиус круга катания, то раскатанные уплощенные места на поверхности будут расценены как выбоины. На практике дефекты некруглости называют ползунами. Если выбоину оценивать по виду поперечного профиля обода, то она обычно имеет вид плоской лунки.

Некруглость поверхности катания увеличивает воздействие вертикальных нагрузок и тяговой силы. Величина этих сил увеличивается за счет воздействия вертикальных нагрузок вращающихся масс. Вертикальные нагрузки возрастают в квадратичной зависимости от скорости движущейся массы. У подвижного состава, движущегося со скоростью 300 км/ч, колесные пары имеют скорость качения более 80 м/с. Даже при скорости, меньшей в 2 раза, вертикальные силы оказывают заметное влияние на общую нагрузку.

«Гидростатические» напряжения в зоне круга катания в состоянии компенсировать циклические нагрузки без возникновения трещин. Это вытекает из того, что пропорционально возрастающим напряжениям этого вида увеличивается сопротивление сдвиговой деформации на плоскостях скольжения кристаллических зерен. Такого рода «гид-

ростатическое» давление, или, другими словами, всестороннее сжатие, можно также назвать всесторонним сопротивлением деформации.

*Влияние ударных нагрузок.* Из теории и практики известно, что в стали с одинаковыми механическими свойствами могут появиться трещины, являющиеся результатом хрупкого или вязкого (пластического) разрушения. Точнее сказать, речь идет об изломах с разной долей пластической деформации на поверхности излома. На характер излома влияет скорость приложения ударной нагрузки. При более высокой скорости увеличивается сопротивление деформации в месте контакта, вызывающее хрупкость стали. В наибольшей степени это проявляется у колес с некруглостью, где в значительной мере охрупчивается зона ползунов. Хладноломкость также способствует возникновению хрупких трещин и расслоений. На стохастическую направленность трещин сдвига в местах ползунов влияет «гидростатическое» давление и, соответственно, всестороннее сопротивление деформации при качении.

Каждая единица подвижного состава проходит многократно повторяющиеся циклы, включающие в себя трогание и разгон, выход на заданную скорость, торможение и остановку. При этом повторяются воздействия низких и высоких значений скорости нагружения. Как уже было сказано, высокая скорость вызывает охрупчивание и расслоение, в то время как низкая скорость обуславливает высокую вязкость стали и ее пластичный характер разрушения.

На хрупкое разрушение стали также влияют температура и повышенное содержание углерода. Чем ниже температура, тем сильнее и заметнее хрупкость. Известно, что при низких температурах эксплуатации и более высоком содержании углерода хрупкие разрушения колес и рельсов происходят чаще.

*Дефекты выкрашивания в зоне круга катания.* С появлением трещин в зоне круга катания значительно снижается сопротивление деформации, потому что прекращается действие «гидростатического» давления вокруг трещин.

В колесе с указанными трещинами твердость поверхности катания соответствует основным механическим параметрам применяемых сортов стали. При воздействии «гидростатического» давления в зоне круга катания произошла небольшая пластическая деформация. В результате уменьшилось сопротивление деформации и стало возможным зарождение и постепенное разветвление трещин.

Материал, находящийся между трещинами, также подвергается деформации силами сжатия. В процессе деформации он «скользит» между трещинами, наполняя на поверхность катания, а затем раскатывается. Одновременно деформируются поверхности трещин. При дальнейшем прогрессирующем дефекта происходит частичное выкрашивание и разрушение плоских частичек с появлением углублений.

Поврежденная такими углублениями поверхность возбуждает в колесе колебания, в результате чего качение сопровождается ударами с более высокой частотой чередования. Далее новые динамические удары, вызываемые влиянием пружин первичного рессорного подвешивания тележки, распространяют дефекты выкрашивания по всему кругу катания колеса.

*Выкрашивания за пределами зоны круга катания.* Существуют дефекты, находящиеся вблизи гребня бандажа и у наружного края профиля колеса. Контакт колеса с обеими областями поверхности катания рельса реализуется в результате попеременных смещений колесной пары от центрального положения. Это происходит при прохождении кривых и при максимальном отклонении колесной пары при извилистом движе-

нии. На поверхность катания колес воздействуют вертикальная нагрузка и касательная сила тяги. Обе силы оказывают интенсивное воздействие на поверхности катания колеса и рельса и действуют перпендикулярно друг другу. Под действием двух перпендикулярных друг другу напряжений создаются напряжения сдвига, вызывающие косые поверхностные трещины под наклоном  $45^\circ$  к поверхности катания. Эти небольшие трещины уменьшают поверхностные остаточные напряжения, поэтому при дальнейшем увеличении нагрузки качения развиваются основные и побочные трещины сдвига.

Здесь так же, как и в зоне круга катания, материал, находящийся между трещинами, подвергается деформации сжатия с последующим раскатыванием появившихся выступов. При прогрессирующем дефекта происходит частичное выкрашивание и разрушение поверхности катания. Металлографический анализ материала этих зон подтвердил его 100%-ную сфероидизацию.

*Холодная пластическая деформация поверхности катания.* При холодной деформации происходят упрочнение и нагрев деформированного материала. В технической практике это явление хорошо известно. При упрочнении достигают высоких механических характеристик металла. С повышением температуры затраты энергии на деформацию ниже. На конечный результат оказывают влияние скорость обработки и отвод тепла. При высокой скорости обработки (величине пластической деформации за единицу времени) и малом отводе тепла увеличивается накапливаемая тепловая энергия, в результате чего сопротивление деформации снижается. Это может быть использовано, например, при скоростном волочении проволоки.

При нагружении образца работа пластического деформирования на 90–95% преобразуется в тепло, а

остальная доля повышает внутреннюю энергию. Дефект выкрашивания при пластической деформации увеличивает аккумуляцию тепловой энергии, так как трещины, окружающие деформированную область, ухудшают теплоотвод. В процессе продолжительной эксплуатации колес происходит диффузионный переход от неустойчивого пластинчатого перлита к термомеханически устойчивому зернистому перлиту со 100%-ной сфероидизацией.

### Неблагоприятные воздействия дефектов поверхности катания

Из-за дефектов возрастает динамическое воздействие колес на рельсы, которое передается на все верхнее строение пути.

Некруглость поверхности катания колес также приводит к неблагоприятным последствиям. Она не только является причиной возникновения дефектов выкрашивания, но и, кроме того, вследствие динамических ударов увеличивает фреттинг-коррозию подступичной части оси колесной пары и создает угрозу для осевого подшипника. В результате таких воздействий уменьшается срок службы, возникает угроза безопасности движения и увеличивается уровень шума, излучаемого подвижным составом.

Достаточно убедительным является мнение о том, что некруглость колес стала основной причиной крупной аварии близ Эшеде высокоскоростного поезда ICE. Его колеса были снабжены резиновыми абсорберами в виде колец, установленных между бандажом и колесным центром. В соответствии с исследованиями, проведенными после аварии, было установлено, что колеса имели значительные некруглости. Прямые удары на высокой скорости могли стать причиной хрупкого излома и разрушения при изгибе вследствие усталости материала на

внутренней поверхности обода колеса. Колеса подобного типа широко распространены на городском транспорте, но они эксплуатируются в более низком диапазоне скорости.

Знание причин возникновения поверхностных дефектов и ныне существующих возможностей их устранения позволяет восстанавливать профили колес еще на начальном этапе возникновения дефекта.

### Напряженное состояние рельса

Как и в колесе, в головке рельса максимальные сжимающие напряжения действуют в средней части поверхности катания и снижаются к краям. В связи с этим влияние вертикальных сил имеет максимум в средней области поверхности катания при напряженном состоянии, обусловленном сжатием по трем осям при качении (рис. 1). Указанное влияние проявляется как сопротивление деформации качения, которое препятствует деформированию зерен. В направлении к краям головки рельса сопротивление снижается, вследствие чего возможно распространение деформации по ширине. В результате эта ширина будет характеризоваться возникновением пластинчатой структуры деформированных зерен, а также образованием грата.

В процессе качения трехосное напряженное состояние сжатия в средней области головки рельса обусловлено «гидростатическим» давлением, как и в зоне круга катания колеса. Из практики деформирования под действием такого давления известно, что значения предела текучести и пластической вязкости в этом случае значительно выше, чем при растяжении. С ростом «гидростатического» давления оба параметра увеличиваются линейно. Этот факт должен учитываться при оценке перспектив увеличения объемов перевозок по магистральным линиям, выполняе-

мых поездами с большими осевыми нагрузками.

*Действие направляющих и вертикальных сил.* Под действием боковых направляющих сил зерна на краю рабочей грани головки рельса деформируются на максимальную глубину (рис. 2). В направлении к середине головки рельса глубина распространения деформированных зерен ступенчато уменьшается и достигает минимума на наружной грани. Во всей деформированной области имеют место явления сдвига зерен, при этом на рабочей грани возникают сдвиговые трещины.

В случае действия больших вертикальных и малых направляющих сил (рис. 3) «гидростатическое» давление в средней области поверхности катания рельса не деформирует зерна. Деформация их происходит лишь в зоне наружной грани головки. В этой деформированной области микроструктура имеет пластинчатый характер. При этом слой деформированных зерен распространяется на значительную глубину, а на наружной грани образуется грат. В зоне рабочей грани направляющие силы вызывают деформацию сдвига лишь в ограниченной области поверхности катания.

Когда действуют малые вертикальные и большие направляющие силы (рис. 4), на рабочей грани образуется максимальный слой зерен со сдвиговой деформацией, ступенчато уменьшающийся (не до нулевого значения) к середине поверхности катания. Вертикальные силы, вследствие которых в средней области возникает «гидростатическое» давление, на деформацию зерен не влияют, но в области наружной грани они увеличивают глубину распространения деформации зерен.

В ходе исследований на поверхности головки обнаружен тонкий слой (около 30 мкм) мелкозернистого мартенсита, возникающий вследствие трения колеса о рельс при двухточечном контакте под действием вертикальных и направляющих сил.

*Влияние сопротивления деформации качения.* В теории пластических деформаций используется понятие «сопротивление деформации», отражающее свойства материала при деформировании. В данном случае речь идет об этом сопротивлении в условиях, когда действует нагрузка в виде качения колеса по рельсу. При этом имеет место не только упругая контактная деформация. Исследования показали, что под поверхностью катания имеются пластически деформированные зерна.

Сопротивление деформации обусловлено рядом факторов, в том числе природной прочностью стали, выражающейся в высоких значениях предела текучести и твердости. Для изготовления железнодорожных колес и рельсов применяется перлитная сталь со средним

содержанием углерода. Сталь с высоким содержанием углерода обладает более низкой ударной вязкостью, а в легированном состоянии вызывает повышенный абразивный износ поверхностей катания вследствие наличия твердых оксидных частиц.

Напряженное состояние качения также определяет величину сопротивления деформации. При трехосном напряженном состоянии сжатия, или «гидростатическом» давлении, сопротивление деформации качения максимальное. В направлении к наружной грани обода колеса уровни напряженного состояния и сопротивления деформации качения снижаются. Минимальный уровень напряженного состояния качения имеет место при действии направляющих сил.

### Износ поверхностей катания и восстановление профиля

Износ зависит от частоты приложения нагрузки качения, величины вертикальной, направляющей и тяговой сил, а также от сопротивления деформации качения.

Поскольку в средней области профилей колеса и рельса действует «гидростатическое» давление, под наружным слоем деформация зерен не происходит. Незначительное окисление поверхности соответствует умеренному уровню износа. В то же время направляющие силы деформируют зерна напряжениями сдвига на большую глубину, повышают окисление поверхности и одновременно увеличивают износ в наружных областях профилей колеса и рельса

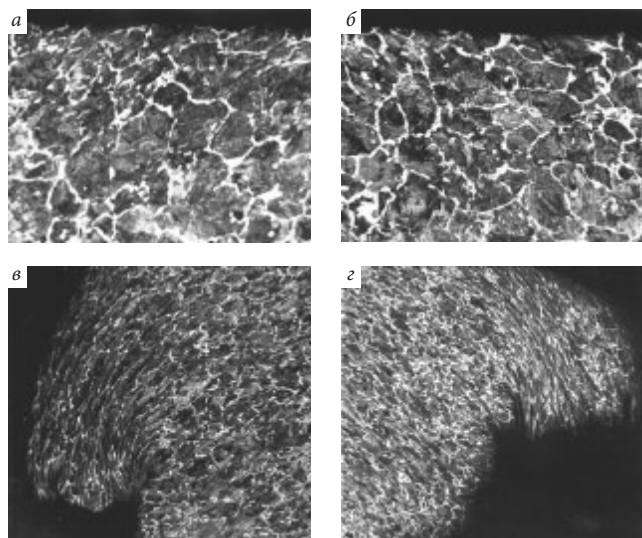


Рис. 1. Микроструктура стали при воздействии вертикальных сил: *a* — средняя зона поверхности катания рельса; *б* — зона у наружного края поверхности катания; *в* — грат на рабочей грани головки рельса; *z* — грат на наружной грани

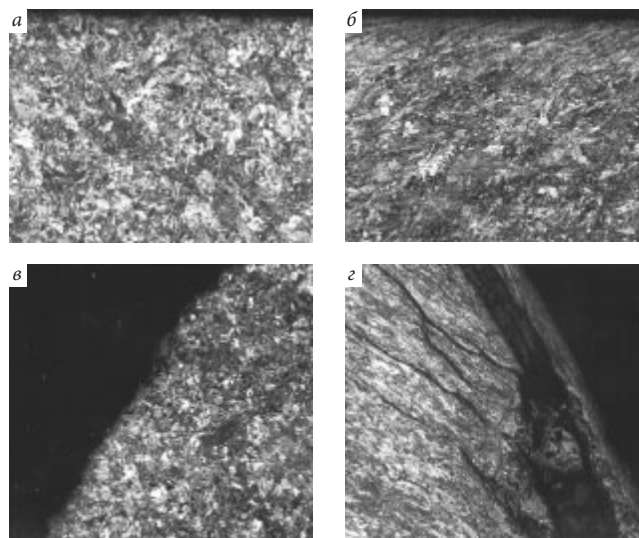


Рис. 2. Действие направляющей силы: *a* — средняя зона поверхности катания рельса; *б* — увеличение глубины деформирования зерен при удалении к наружному краю профиля рельса; *в* — рабочая грань; *z* — максимальная глубина распространения деформации зерен и грат на наружной грани

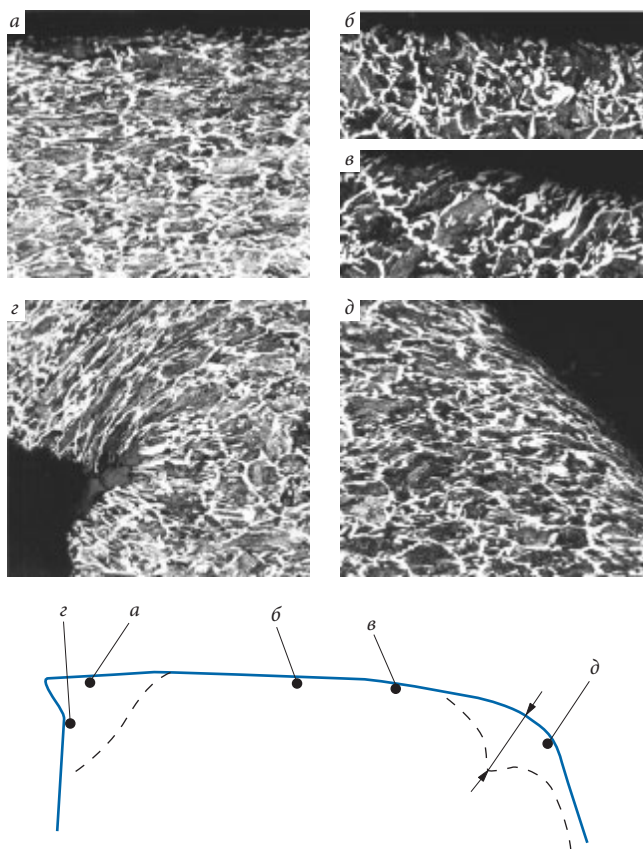


Рис. 3. Действие больших вертикальных и малых направляющих сил:

*a* — зона у наружного края профиля с большой глубиной распространения деформации зерен; *б* — средняя зона поверхности катания, в которой отсутствует деформация зерен; *в* — при смещении от средней зоны в направлении рабочей грани появляется тонкий слой деформированных зерен; *г* — грат на наружной грани головки рельса; *д* — рабочая грань с большой глубиной деформации

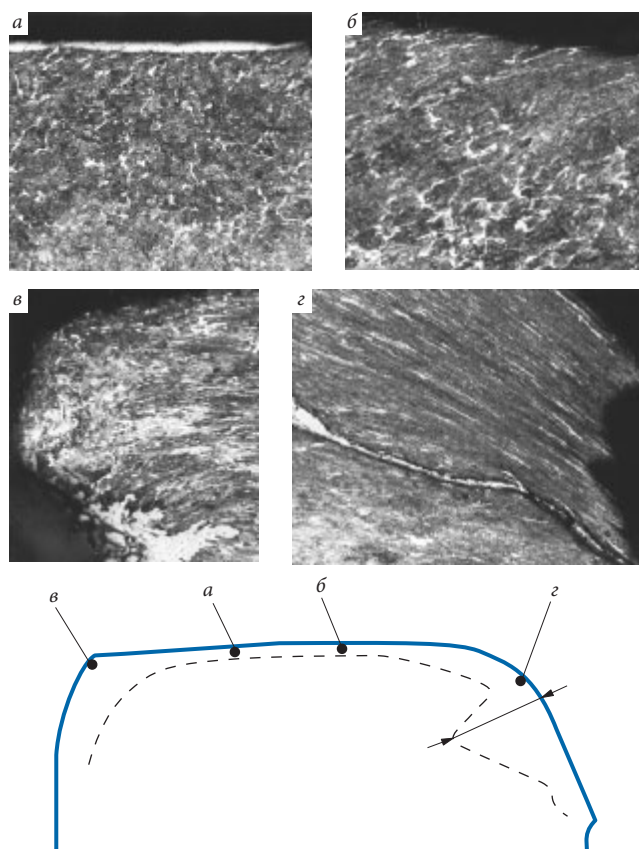


Рис. 4. Действие малых вертикальных и больших направляющих сил:

*a* — средняя зона поверхности катания с небольшой глубиной деформации материала; *б* — увеличение глубины деформации при удалении в сторону рабочей грани; *в* — большая глубина распространения деформации и грат на наружной грани головки рельса; *г* — рабочая грань с максимальной глубиной деформации

са, где сопротивление деформации минимально. Образование грата также способствует повышенному износу. В наружных областях профилей выявляются отслаивания металла как на колесах, так и на рельсах. Большую опасность представляет также образование в этих зонах колеса тепловых трещин и выкрашиваний.

На внутренние зоны профилей колеса и рельса действуют вертикальные и направляющие силы. Они повышают степень окисления поверхностей и глубину распространения деформации зерен, вследствие чего возникает повышенный износ. На колесах появляются выкрашивания, на рельсах — трещины в головке.

На полого вогнутом профиле колеса и рабочей грани рельса деформированные зерна распространяются на большую глубину. Это обусловлено высокими направляющими силами и пассивным трением, а также возможным выгоранием легирующих элементов в колесе в результате интенсивного колодочного торможения. При этом значительно повышается износ. Восстановление профиля колеса и рабочей грани рельса требует глубокого съема металла. Смазывание контактирующих поверхностей снижает износ лишь частично.

Интенсивность износа в большей степени определяется отношением направляющей силы к вертикальной. Это отношение увеличи-

вается при воздействии на колесо поперечных сил и движении экипажа в кривых малого радиуса. Наиболее благоприятными в этом отношении являются конформный контакт профилей колеса и рельса и применение тележек с поперечным подрессориванием. К этой категории относятся тележки с механизмом наклона кузова и мехатронные, а также типа Flexifloat и тележки с винтовыми рессорами малого диаметра.

Дефекты поверхностей катания колес являются причиной повышения динамических нагрузок. Они передаются от колес на тележки, кузов и через рельсы — на путь. Из-за дефектов рельсов ухудшается качество пути, от которого дина-

мические воздействия передаются на тележки и кузов.

Указанные дефекты не только отрицательно влияют на поверхности катания у наружного края профиля, но могут также стать причиной появления внутренних дефектов, влекущих за собой изломы колес и рельсов. Наибольшую опасность представляют отслоения, выкрашивания и тепловые трещины. Возникающие усталостные микротрещины распространяются внутрь обода колеса или головки рельса, пока не достигнут состояния, при котором происходит хрупкий излом. Результатом этого являются аварии поездов, сопровождающиеся значительным материальным ущербом и человеческими жертвами.

Дефекты развиваются ступенчато. Они начинаются с инициирования и зарождения микротрещин, которые вырастают до больших усталостных трещин, вызывающих излом. Интервал времени от начала эксплуатации колеса или рельса до инициирования микротрещин больше, чем интервал между инициированием и появлением больших трещин. Опыт современной эксплуатации показывает, что лучшей профилактикой дефектов является оптимальное восстановление профиля, т. е. его обновление до появления дефектов. Однако соответствующие интервалы времени короче тех, которые рекомендуются инструкциями по техническому осмотру и обслуживанию подвижного состава и пути.

Сейчас имеется некоторый опыт эксплуатации рельсов с оптимальным восстановлением профиля. Компании, специализирующиеся на работах такого рода, оснащены мощными мобильными измерительными системами и шлифовальными машинами. Однако для восстановления пути на каком-либо участке требуется его закрытие для движения поездов.

Благодаря восстановлению поверхности катания железнодорожных колес и рельсов и повышению

усталостной прочности осей можно также способствовать увеличению срока их службы. За счет уменьшения некруглости колес и неплоскостности рельсов сглаживаются динамические воздействия, уменьшаются амплитуды изгибных колебаний осей колесных пар и отодвигается неблагоприятное влияние фрикционной коррозии.

Для устранения некруглости колес подвижного состава, предназначенного для пассажирских перевозок, используют временные интервалы, необходимые для регулярных отстоев с целью проведения очистки ходовой части и контроля всех ее параметров, в том числе некруглости колес. Измерения ее должны проводиться достаточно часто. При этом в распоряжении должны иметься станки для обточки колесных пар без выкатки.

Для колес грузовых вагонов подобное восстановление круглости организовать сложнее. Для этого требуется установка измерительных устройств, обеспечивающих возможность частых измерений колес во время движения. Грузовые вагоны с неправильным профилем колес должны направляться в отстой при формировании поездов на сортировочных станциях, и колесные пары на этих станциях должны заменяться восстановленными. Де-

монтированные колесные пары затем обрабатывают на токарных станках непосредственно на сортировочных станциях или в специальных подразделениях.

## Заключение

Оптимальное восстановление профиля благоприятно влияет на динамические условия перевозок, что повышает срок службы пути, улучшает безопасность железнодорожной техники и снижает величину затрат жизненного цикла.

Требования к качеству восстановления профиля эксплуатируемых колес и изготовления новых приобретают особое значение в условиях либерализации и гармонизации железнодорожных перевозок на сети Европы.

Повышение качества новых колес имеет большое значение и для обеспечения безопасности движения поездов. Компания Bonatrans (Чехия) разработала оптимизированное колесо, рассчитанное на увеличенный срок службы и экстремальные нагрузки (рис. 5).

Такие колеса предназначены для грузового подвижного состава с высокой осевой нагрузкой (25 т и более) и колодочными тормозами. Оптимизация конструкции и выбора материала реализована с использованием современных методов расчета и испытаний. По сравнению со стандартными колесами грузовых вагонов МСЖД новые колеса характеризуются значительно меньшими остаточными напряжениями (на 40–50%) и пониженным трендом к возникновению усталостных дефектов (более чем на 60%). Это уменьшает опасность повреждения колес и возникновения аварийных ситуаций.



Рис. 5. Оптимизированное колесо компании Bonatrans для грузовых вагонов

По материалам группы компаний ZDB ([www.zdb.cz](http://www.zdb.cz)), компании Bonatrans ([www.bonatrans.cz](http://www.bonatrans.cz)) и Технического университета Остравы VSB-TU ([www.vsb.cz](http://www.vsb.cz)).