Нурмухамматова Нилюфар Шерзод кизи

студентка магистратуры

Ахмадов Мухриддин Бойназар угли

студент магистратуры;

Саломов Азизбек Бахтиер угли

студент баклавриата.

Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС» ПОСРЕДСТВОМ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ.

Аннотация. В статье рассмотрены трибологические и прочностные закономерности, определяющие срок службы пары «колесо – рельс», и обоснован подход к рациональному подбору свойств материалов колеса и рельса. Показано, что ресурс контакта определяется не отдельным параметром твердости, а согласованием комплекса характеристик: поверхностной твердости, предела прочности, сопротивления контактной усталости, ударной вязкости, чистоты металла по неметаллическим включениям, остаточных напряжений и способности материала к наклепу без развития хрупких повреждений. На основе классических представлений Герца о контактных напряжениях и закона Арчарда для изнашивания сформулирован инженерный критерий выбора сочетания материалов, при котором снижается как износ обода колеса, так и повреждаемость головки рельса. Обосновано, что для большинства режимов эксплуатации целесообразно обеспечивать умеренное превышение твердости рельса над твердостью колеса, сохраняя при этом более высокую вязкость и трещиностойкость колесной стали. Такой подход позволяет перераспределять износ в сторону ремонтопригодного элемента, уменьшать глубину пластических сдвигов в поверхностном слое и снижать вероятность развития выкрашивания, поверхностных усталостных трещин и термомеханических дефектов. Предложены рекомендуемые диапазоны свойств материалов для смешанного движения, тяжеловесного движения и работы в кривых малого радиуса.

Ключевые слова. колесо – рельс; износ; контактная усталость; твердость; колесная сталь; рельсовая сталь; ресурс; трибология.

Введение. Пара «колесо – рельс» относится к наиболее нагруженным узлам железнодорожной техники. В относительно малой зоне контакта концентрируются высокие нормальные и касательные напряжения, многомиллионные циклы нагружения, локальное проскальзывание, нагрев и интенсивное структурное упрочнение поверхностного слоя. В реальной эксплуатации контакт работает в условиях сложного сочетания механизмов повреждения: абразивного, адгезионного и окислительного изнашивания, поверхностной и подповерхностной контактной усталости, пластического течения металла, термических повреждений при торможении, а также развития волн износа и неравномерностей профиля [1–5].

Традиционно повышение ресурса элементов пути и колесных пар связывают с отдельными организационно-техническими мерами: шлифованием рельсов, корректировкой профилей, смазыванием гребней и рабочих граней, оптимизацией режимов тяги и торможения. Однако опыт эксплуатации показывает, что даже при хорошем уровне обслуживания ресурс может оставаться ограниченным, если свойства материалов колес и рельсов подобраны нерационально. Слишком мягкий материал приводит к быстрому износу и изменению профиля; чрезмерно твердый и хрупкий — к накоплению остаточных напряжений, сетке трещин и выкрашиванию. Следовательно, постановка задачи должна быть системной: необходимо выбрать такое сочетание свойств, при котором контактная пара работает как согласованная трибомеханическая система, а не как два изолированных элемента.

Цель статьи — обосновать принципы рационального подбора свойств материалов пары «колесо – рельс» и предложить инженерные ориентиры по выбору твердости, прочности и вязкости для различных условий эксплуатации. В отличие от упрощенного подхода «чем тверже, тем лучше», в работе рассматривается компромисс между износостойкостью, сопротивлением контактной усталости и ремонтопригодностью элементов.

Контактные напряжения и механизмы разрушения. В основе анализа лежит теория упругого контакта Герца, согласно которой при качении колеса по рельсу реальная площадь соприкосновения мала по сравнению с габаритами деталей, а максимальные напряжения локализуются вблизи поверхности и в подповерхностном слое. Рост осевой нагрузки, ухудшение профиля, повышение коэффициента трения или локальное проскальзывание ведут к увеличению пиковых напряжений и сдвиговых деформаций. Даже при отсутствии макроскопического скольжения контакт не является идеально чистым качением: в зоне входа и выхода пятна контакта возникают микроскольжения, определяющие интенсивность изнашивания и развитие усталостных трещин. Для первичной инженерной оценки износа удобно использовать закон Арчарда:

$$V = K \cdot W \cdot L / H,$$

где V – объем износа, K – коэффициент изнашивания, W – нормальная нагрузка, L – путь скольжения, H – твердость материала. Формула показывает, что рост твердости действительно снижает износ, но только при неизменности других факторов. На практике же коэффициент K зависит от микроструктуры, чистоты металла, температуры, смазывания и характера оксидных пленок, а чрезмерное повышение твердости может ухудшить способность материала релаксировать локальные напряжения. Поэтому фактический ресурс определяется не только Н, но и устойчивостью структуры к контактной усталости.

В железнодорожном контакте наиболее опасны три группы дефектов. Во-первых, **износ** — равномерный или локальный, приводящий к изменению профиля, увеличению динамических нагрузок и ухудшению условий вписывания в кривые. Во-вторых, **контактная усталость** – поверхностные и подповерхностные трещины, выкрашивание, шелушение, сполы. В-третьих, **термомеханические повреждения**, особенно характерные для интенсивного торможения, когда локальный нагрев и последующее быстрое охлаждение приводят к формированию белого слоя, зон вторичной закалки и сетки трещин. Оптимизация свойств материалов должна одновременно сдерживать все три механизма.

Роль микроструктуры и механических свойств. Для колес и рельсов наилучшие эксплуатационные свойства обычно обеспечивает мелкодисперсная перлитная структура, сочетающая высокую несущую способность с достаточной пластичностью. Упрочнение рельсовой стали за счет повышения дисперсности перлита, термообработки головки рельса и снижения уровня загрязненности включениями повышает сопротивление износу и контактной усталости. Для колесной стали, помимо прочности, критически важна ударная вязкость и способность поверхностного слоя к контролируемому наклепу без перехода в хрупкое состояние. Именно поэтому в инженерной практике нерационально выбирать колесо столь же твердым или более твердым, чем рельс, если это достигается ценой снижения вязкости.

Согласование свойств должно учитывать различную ремонтопригодность элементов. Колесо, как правило, легче поддается обточке и замене, чем рельс в пути. Следовательно, в ряде случаев оправдано смещать часть износа в сторону колеса, но не допускать лавинообразного увеличения его интенсивности. Рациональная стратегия состоит в том, чтобы рельс обладал несколько большей твердостью и контактной выносливостью, а колесо — несколько большей вязкостью и сопротивлением распространению трещин. Тогда система работает в более «мягком» режиме: рельс меньше подвержен пластическим наплывам и волнообразному износу, а колесо сохраняет устойчивость к зарождению трещин от термомеханических и ударных воздействий.

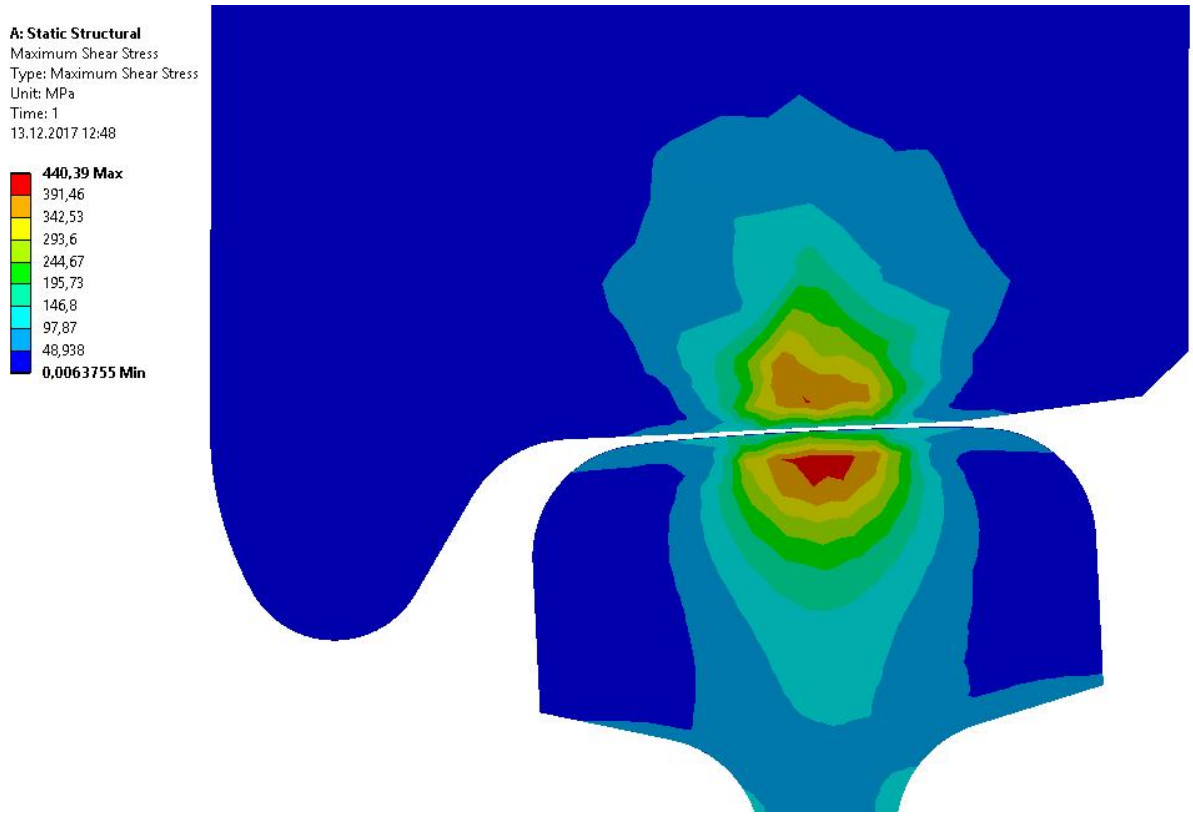


Рисунок 1 – Иллюстрация зоны контакта в паре «колесо – рельс».

Материалы и методический подход к подбору свойств. Для инженерной оценки рационального сочетания материалов в работе использован сравнительный подход, основанный на следующих группах параметров: твердость поверхности катания, предел прочности, пластичность, ударная вязкость/трещиностойкость, чистота металла,

остаточные напряжения после термообработки, склонность к наклепу и глубина упрочненного слоя. В качестве ориентира рассмотрены современные колесные стали класса ER7/ER8 и рельсовые стали повышенной твердости с твердостью головки в диапазоне порядка 350–390 HB, применяемые на линиях с высокими нагрузками.

Введем условный **интегральный критерий повреждаемости J**, который объединяет вклад износа колеса, износа рельса и риска контактной усталости:

$$\mathbf{J = \alpha \cdot I_к + \beta \cdot I_р + \gamma \cdot I_{ку}},$$

где $I_к$ – индекс износа колеса, $I_р$ – индекс износа рельса, Iку — индекс контактной усталости, а коэффициенты α, β и γ отражают экономическую значимость дефектов для конкретного типа линии. Хотя такой критерий не заменяет полноценных стендовых испытаний, он позволяет логично сопоставлять материалы и выбирать компромисс между долговечностью и ремонтопригодностью.

В рамках этого подхода ключевым управляемым параметром принято отношение твердостей $\mathbf{H_к/H_р}$, где $H_к$ – твердость колеса, $H_р$ – твердость рельса. При $H_к/H_р < 1$ колесо мягче рельса; при $H_к/H_р > 1$ – наоборот. Анализ трибологических закономерностей показывает, что чрезмерное уменьшение этого отношения ускоряет износ колеса, тогда как его рост выше единицы ведет к интенсификации повреждения рельса, особенно в зоне действия высоких контактных напряжений и проскальзывания. Следовательно, рациональный диапазон следует искать вблизи единицы, но с умеренным смещением в сторону более твердого рельса.

Таблица 1 — Рекомендуемое сочетание свойств материалов для различных условий эксплуатации

Условия работы	**Колесо**	**Рельс**	**Ожидаемый эффект**
Смешанное движение (пассажирское + грузовое)	Твердость поверхности несколько ниже рельса; высокая вязкость; стабильный наклеп без сетки термотрещин.	Умеренно повышенная твердость головки; высокая чистота металла; устойчивость к волнообразному износу.	Снижение суммарного износа, стабильность профиля и приемлемый межремонтный интервал.
Тяжеловесное движение	Повышенная прочность обода при сохранении трещиностойкости; контроль остаточных напряжений после термообработки.	Высокая твердость и контактная выносливость; повышенное сопротивление пластическому течению.	Снижение контактной деформации и роста поверхностных усталостных дефектов.
Кривые малого радиуса, интенсивные боковые силы	Повышенная вязкость и сопротивление тепловым трещинам; допустим	Твердость и износостойкость рабочей грани; совместимость со смазыванием и шлифованием.	Снижение бокового износа рельса и стабилизация контакта в кривых.

	несколько больший контролируемый износ.		

Результаты анализа и обсуждение. Расчетная оценка интегрального критерия повреждаемости показывает, что минимум суммарного ущерба наблюдается не при максимальной твердости колеса или рельса, а в зоне сбалансированных свойств, где рельс немного тверже колеса. Для большинства режимов смешанного движения инженерно оправдано принимать твердость поверхности катания колеса на 20–40 НВ ниже твердости головки рельса. Для тяжеловесного движения, кривых малого радиуса и участков с повышенными контактными напряжениями разность может быть увеличена до 40–70 НВ, однако только при сохранении достаточной вязкости колесной стали и жесткого контроля остаточных напряжений.

Физический смысл этой рекомендации состоит в следующем. Если колесо заметно мягче рельса, оно быстро изнашивается, теряет профиль, возрастает частота обточек и риск тепловых повреждений при торможении. Если же колесо равно по твердости рельсу или превосходит его, возрастает контактное повреждение рельса: появляются пластические наплывы, увеличивается риск волнообразного износа и поверхностной усталости. Небольшое превышение твердости рельса позволяет сохранить геометрию пути и одновременно не переводит колесо в режим катастрофически ускоренного износа.

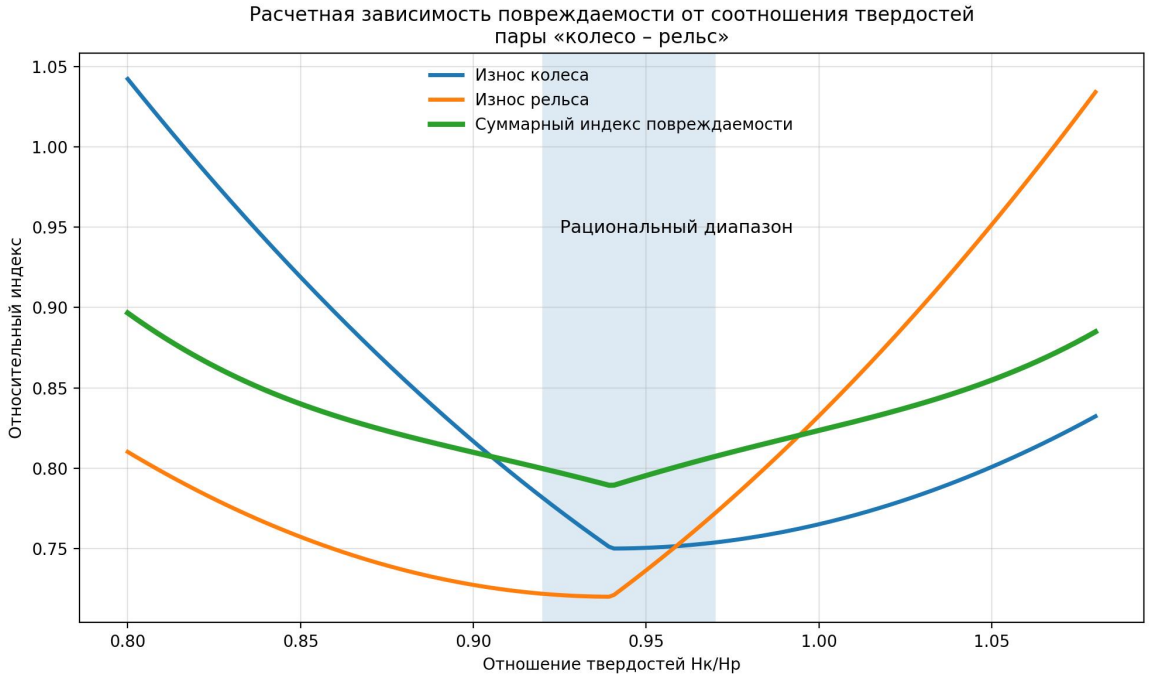


Рисунок 2 – Расчетная зависимость относительной повреждаемости от отношения твердостей Нк/Нр; минимум суммарного индекса достигается в зоне умеренно более твердого рельса.

Вязкость, чистота металла и остаточные напряжения. Одной твердости недостаточно для надежного прогнозирования ресурса. Для колес особенно важны ударная вязкость и трещиностойкость, поскольку колесо испытывает ударные воздействия на стыках, стрелочных переводах и локальных неровностях, а также термические циклы при торможении. Повышение твердости без обеспечения достаточной вязкости способно сократить ресурс из-за развития поверхностной сетки трещин и хрупкого выкрашивания. Аналогично для рельсовой стали недостаточно просто увеличить твердость головки:

требуется высокая металлургическая чистота, мелкопластинчатый перлит и благоприятное распределение остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое.

С точки зрения материаловедения ресурс контакта возрастает, когда в поверхностном слое реализуется контролируемый наклеп: дислокационная структура повышает сопротивление пластическому течению, но не приводит к локальному охрупчиванию. Это особенно важно для колес, где сочетание упрочнения и вязкости должно предотвращать переход от нормального изнашивания к термическому растрескиванию. Для рельсов благоприятны технологии объемно-поверхностной термообработки, формирующие в головке рельса устойчивую мелкодисперсную перлитную структуру и снижающие вероятность подповерхностного зарождения трещин.

Значение условий эксплуатации. Рациональное сочетание свойств материалов определяется не только маркой стали, но и реальными режимами работы. На прямых участках со стабильным профилем и умеренными нагрузками можно использовать более «мягкую» настройку системы, ориентированную на снижение стоимости жизненного цикла. На участках тяжеловесного движения, в крутых кривых, на горных профилях и в зонах частого служебного торможения требуется более высокий запас контактной выносливости рельса и повышенная стойкость колес к термомеханическим трещинам. Следовательно, универсального сочетания свойств для всей сети не существует; должны применяться дифференцированные рекомендации по участкам эксплуатации.

Важно подчеркнуть, что подбор материалов не заменяет эксплуатационных мер, а работает совместно с ними. Эффект от рациональной твердости и микроструктуры наиболее полно реализуется при правильной геометрии профиля, регулярном шлифовании рельсов, контроле шероховатости, использовании смазывания/модификаторов трения и предотвращении перегрева колесных поверхностей. Тем не менее именно свойства материалов задают базовый потенциал долговечности, на который уже «накладываются» условия пути и движения.

Практические рекомендации по повышению ресурса. На основании выполненного анализа можно предложить следующие инженерные рекомендации. Во-первых, при выборе пары материалов следует ориентироваться не на максимальную твердость колеса, а на умеренно более твердый рельс при сохранении достаточной вязкости колеса. Во-вторых, для участков с высокими осевыми нагрузками необходимо контролировать не только номинальную твердость, но и глубину упрочненного слоя, равномерность структуры по сечению и уровень остаточных напряжений. В-третьих, следует стремиться к снижению загрязненности колесной и рельсовой стали неметаллическими включениями, поскольку они служат концентраторами напряжений и ускоряют контактно-усталостное разрушение.

В-четвертых, рациональный подбор свойств материалов должен сопровождаться мониторингом фактических повреждений: темпа износа профилей, глубины выкрашивания, числа обточек, частоты шлифования и интенсивности дефектов контактной усталости. Именно обратная связь с эксплуатацией позволяет уточнить оптимальное соотношение свойств для конкретной линии. В-пятых, для кривых малого радиуса целесообразно сочетать более износостойкую рельсовую сталь с колесным материалом повышенной вязкости и устойчивости к тепловым трещинам, дополняя это смазыванием рабочей грани и контролем бокового контакта.

Практически рациональный подбор материалов можно представить как последовательность из пяти шагов: 1) анализ режима нагружения и спектра повреждений

на участке; 2) выбор целевого распределения износа между колесом и рельсом; 3) назначение диапазона твердости и прочности для обеих деталей; 4) проверка вязкости, чистоты металла и остаточных напряжений; 5) эксплуатационная верификация по данным диагностики. Такой алгоритм позволяет перейти от эмпирического выбора стали к управлению ресурсом на основе понятных физико-механических критериев.

Выводы

1. Ресурс пары «колесо – рельс» определяется совместным действием износа, контактной усталости и термомеханических повреждений, поэтому выбор материала должен основываться на системном подходе, а не на максимизации одного свойства.

2. Наиболее рациональным для большинства условий является сочетание, при котором рельс обладает умеренно большей твердостью и контактной выносливостью, а колесо – большей вязкостью и устойчивостью к развитию трещин.

3. Для смешанного движения целесообразно ориентироваться на разность твердостей порядка 20–40 НВ в пользу рельса; для тяжеловесного движения и сложных кривых этот интервал может быть увеличен при условии обеспечения трещиностойкости колеса.

4. Существенный вклад в повышение ресурса вносят металлургическая чистота, мелкодисперсная перлитная структура, контроль остаточных напряжений и способность поверхностного слоя к стабильному наклепу без охрупчивания.

5. Рациональный подбор свойств материалов наиболее эффективен при совместном применении с корректировкой профилей, смазыванием, шлифованием рельсов и мониторингом фактической повреждаемости.

Список литературы

1. ГОСТ 33783-2016. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности. М.: Стандартинформ, 2016. – 68 с.
2. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями и дополнениями. – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 318 с.
3. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость. Рекомендации. Р 50-54-30-87. – М.: Стандартинформ, 1998. – 65 с.
4. Балановский А.Е. Триботехнические свойства упрочненных гребней колесных пар/ А.Е. Балановский // Железнодорожный транспорт. – №4. – 2006.
5. Буйносов А.П. Влияние твердости колеса и рельса на их износ / А.П. Буйносов // Локомотив. – 1995. – №3. – С. 31 – 32.