

Л. А. СОСНОВСКИЙ, А. А. КЕБИКОВ, (учреждение образования
«Белорусский государственный университет транспорта», республика Беларусь)

КРИТЕРИЙ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Запропоновани критерій механічного стану сталі, що базується на взаємозв'язку межі контактної втоми, межі витривалості при вигині, межі міцності і твердості. Розроблена методика оцінки механічного стану рейкової сталі. Виконані експериментальні дослідження нетермоупрочнених рейок після експлуатації в умовах метрополітену. Вивчені характер розподілу твердості по поверхні катання головки рейки, встановлені характерні зони її деформації. Виконані мікроструктурні дослідження матеріалу рейок в зоні контакту з колесом. В ході виконаних експериментів одержані підтвердження розробленого критерію.

Предложен критерий механического состояния стали, базирующийся на взаимосвязи предела контактной усталости, предела выносливости при изгибе, предела прочности и твердости. Разработана методика оценки механического состояния рельсовой стали. Выполнены экспериментальные исследования нетермоупрочненных рельсов после эксплуатации в условиях метрополитена. Изучен характер распределения твердости по поверхности катания головки рельса, установлены характерные зоны ее деформирования. Выполнены микроструктурные исследования материала рельсов в зоне контакта с колесом. В ходе выполненных экспериментов получены подтверждения разработанного критерия.

The criterion of mechanical condition of steel, basing on interconnection of a limit of contact fatigue, a limit of mechanical fatigue, a ultimate strength and a hardness. The technique of an estimation of a mechanical condition of a rail steel is developed. Experimental researches of non-thermostrengthened rails after maintenance in conditions of the subway are executed. Character of distribution of hardness on a surface of rolling of the head of a rail is investigated, characteristic zones of its straining are fixed. Microstructural explorations of a material of rails in a superficial zone of contact to a wheel are executed. During the experiments validation of the developed criterion are received.

Введение

Под воздействием колес подвижного состава происходит уменьшение размеров головки железнодорожных рельсов и изменение ее формы, что является следствием работы сил трения в зонах контакта колеса и рельса. Кроме того, из-за действия системы циклических нагрузок в металле происходят: остаточная деформация на поверхности катания, развитие внутренних и поверхностных трещин, изменение напряженного состояния и др. Эти факторы приводят к изменению сопротивления усталости, которое является особым свойством материала, формирующим эксплуатационную долговечность системы колесо/рельс и ее отдельных элементов, в том числе и рельсов. Изучению изменения характеристик механических свойств материала рельсов в процессе эксплуатации посвящены многочисленные исследования [1–6], однако, на наш взгляд, указанная проблема до сих пор остается не решенной. В данной работе в развитие [7, 8] установлен критерий достижения критического состояния

рельсовой стали и выполнено его экспериментальное подтверждение.

1. Критерий механического состояния стали

Одной из важнейших характеристик работоспособности рельсов является предел контактной усталости [1, 9]. Известно, что рост твердости стали (НВ) означает пропорциональное повышение предела контактной усталости p_f . Анализ результатов исследований [9] позволяет принять следующую зависимость

$$p_f = 3,12HB. \quad (1)$$

Изучение массива экспериментальных данных [10] по исследованию связи контактной усталости и твердости конструкционных сталей показывает, что зависимость (1), полученная для рельсовой стали, представляется в этом случае как среднестатистическая.

Хорошо известна тесная связь твердости с пределом прочности [11]:

$$\sigma_B = 3,50HB. \quad (2)$$

Объединим зависимости (1) и (2) на рис. 1

(нижняя его часть), согласовав шкалы HB , HV и σ_B . Прямая $p_f(HB)$ не имеет каких-либо особенностей; она не противоречит устоявшимся научным представлениям.

Другой важнейшей характеристикой работоспособности рельсов является предел выносливости при изгибе [1, 9]. Если выполнить анализ по его связи с твердостью и пределом прочности, на основании изучения банков данных [11–12], можно получить зависимости, показанные в верхней половине рис. 1.

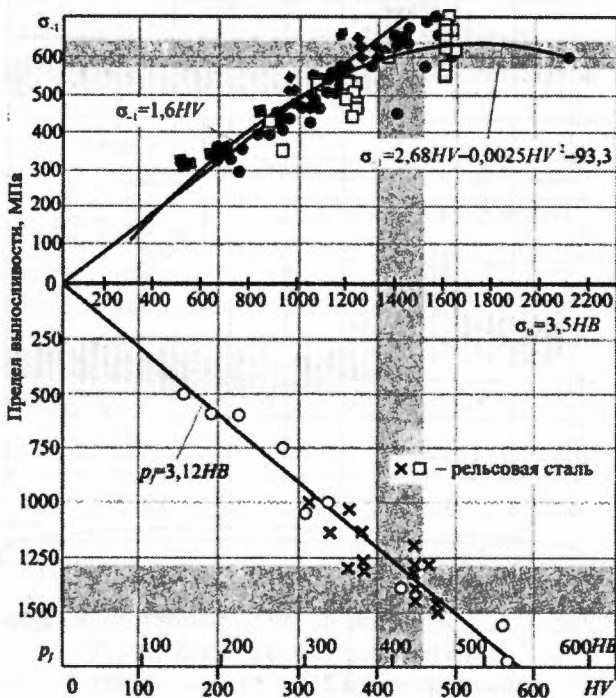


Рис. 1. К анализу взаимосвязей характеристик сопротивления усталости, твердости и предела прочности

Видно, что прямая

$$\sigma_{-1} = 1,60HV. \quad (3)$$

аппроксимирует не всю группу экспериментальных точек, а только те, для которых предел выносливости σ_{-1} не превышает 550 МПа, а твердость $HV \leq 350$. Далее зависимость $\sigma_{-1}(HV)$ становится существенно нелинейной. Основная закономерность такова: если твердость превышает примерно 380 HV, то дальнейший рост твердости не ведет к соответствующему росту сопротивления изгибной усталости в соответствии с (3). Напротив: рост σ_{-1} сначала замедляется, а затем, с достижением твердостью значений примерно 500 HV, сопротивление изгибной усталости при повышении твердости падает. Весь массив экспериментальных точек, представленный в верхней части рис. 1, аппроксимирует, в первом приближении, кривая, уравнение которой

$$\sigma_{-1} = 2,68HV - 0,0025(HV)^2 - 93,3. \quad (4)$$

Общее заключение, которое следует из анализа рис. 1, таково: повышение твердости более величины $\approx 400 HV$, по-видимому, неэффективно для систем, которые работают в условиях одновременного сочетания изгибной и контактной усталости. Именно такие условия реализуются в поверхностной зоне головки рельса.

Таким образом, исходя из изложенного, можно предложить следующую матрицу взаимосвязанных характеристик, которая определяет переход стали в критическое состояние по критериям сопротивления контактной и изгибной усталости:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{-1}^{(k)} &= 550 \dots 650 \text{ МПа,} \\ p_f^{(k)} &= 1200 \dots 1300 \text{ МПа,} \\ HB^{(k)} &= 380 \dots 420, \\ HV^{(k)} &= 400 \dots 440, \\ \sigma_B^{(k)} &= 1300 \dots 1500 \text{ МПа} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если характеристики, указанные в равенствах (5), не превышают установленных величин, то усталостная прочность материала считается обеспеченной. В противном случае следует ожидать возникновения и развития повреждений. Естественно, что эти выводы применительно к такой ответственной системе, каковой является система колесо/рельс, требуют дополнительного обоснования.

На основании (1) – (5) можно предложить следующую методику анализа механического состояния сталей. С использованием зависимостей, представленных на рис. 1, изображается диаграмма состояния, которой придается следующий смысл. Если в процессе работы происходит повышение твердости на поверхности детали, то это означает, что одновременно повышается сопротивление как изгибной, так и контактной усталости. И это повышение отражает упрочнение стали согласно зависимостям $\sigma_{-1}(HV)$ и $p_f(HB)$. Процессы упрочнения будут иметь место только до тех пор, пока для зависимости $\sigma_{-1}(HV)$ не наступит переход в критическую область (затемнено на рис. 1). Это область начала поверхностного разрушения.

Следовательно, рис. 1 можно рассматривать как диаграмму механического состояния металла по критериям изгибной и контактной усталости.

2. Методика оценки механического состояния рельсовой стали

Механическое состояние рельсовой стали можно оценивать как по любой из характеристик, представленных в матрице (5) и на рис. 1, так и по их полной совокупности. Так как твердость наиболее легко определить, а точность измерений твердости по Виккерсу выше, чем по Бринеллю, то предлагаемая методика оценки механического состояния рельсовой стали основана на измерении твердости по Виккерсу.

Исследование твердости на поверхности катания было выполнено для нетермоупрочненных рельсов типа Р50 производства меткомбината "Азовсталь", которые эксплуатировались в Минском метрополитене. Объектами для изучения служили три отрезка рельсов: 1) новый, не бывший в эксплуатации (исходное состояние); 2) снятый с прямого участка пути, после пропуска 300 млн. т брутто, т. е. нормативного тоннажа, характеризующего суммарную наработку рельсов, при достижении которой должна производиться их замена, независимо от того, исчерпана их работоспособность или нет; 3) снятый с прямого участка после пропуска 210 млн. т брутто.

Испытания на твердость методом пробы по Виккерсу проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 2999-75. Схема измерений на поверхности катания рельса представлена на рис. 2. По продольной оси рельса x размечали 50 рядов, в каждом из которых через равные расстояния размечали 50 точек, в которых производили измерения твердости HV .

Измерения на поверхности катания головки рельса, не бывшего в эксплуатации, позволили установить, что значение твердости материала в исходном состоянии не превышало $300 HV$, незначительно варьируясь в интервале ($230...295 HV$) и составляя в среднем $261 HV$.

Для рельсов, бывших в эксплуатации, установлено, что поверхность катания деформируется неравномерно – обнаруживаются три характерные зоны (I, II, III см. рис. 2) определяемые резким изменением полей рассеяния твердости.

По измеренным значениям твердости выполнена оценка характеристик сопротивления усталости и прочности в соответствии с (1)–(4). Результаты расчета приведены в табл. 1.

Проанализируем результаты для рельса, пропустившего 300 млн. т брутто. В зоне I твердость достигает наибольших значений порядка $500...600 HV$ и более, составляя в среднем $480 HV$. Эта зона неравномерна по ширине головки и периодична по ее длине, другими словами, она – нестационарна. Поскольку твер-

дость исходного материала не превышает $300 HV$, то в данном случае имеет место двукратный рост твердости. В зоне II твердость достигает значений порядка $460 HV$, составляя в среднем $410 HV$, т. е. выше первоначальной в 1,5 раза. В зоне III твердость не превышает значений $400 HV$; но в среднем она составляет $320 HV$, т. е. немногим больше (примерно на 25 %) исходной твердости.

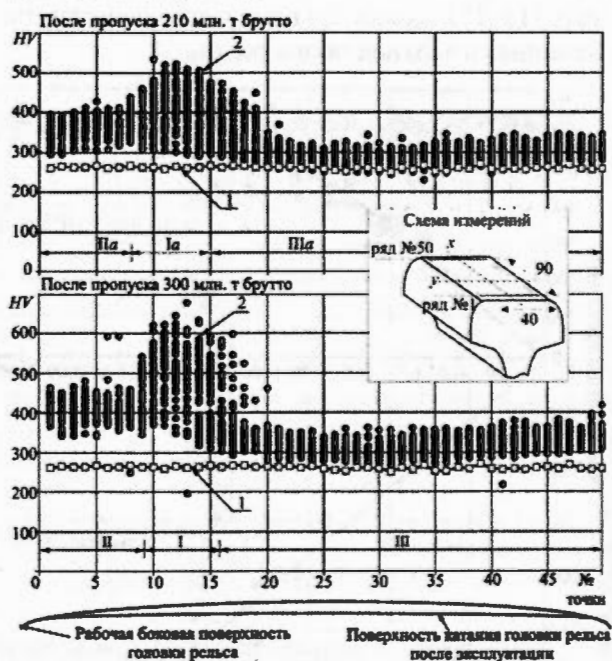


Рис. 2. Распределение по поверхности головки рельса из прямого участка твердости HV после пропуска 210 и 300 млн т брутто: 1 – средняя твердость до эксплуатации, 2 – твердость после эксплуатации

Таблица 1

Средние значения твердости, характеристик сопротивления усталости и предела прочности

Состояние рельсовой стали			
до эксплуатации	после пропуска 300 млн. т брутто		
	зона III	зона II	зона I
Твердость по Виккерсу			
261	320	410	480
Предел выносливости, МПа			
436	506	584	612
Предел контактной усталости, МПа			
793	969	1235	1399
Предел прочности, МПа			
890	1090	1380	1590

Если предел выносливости до эксплуатации в среднем составлял $\sigma_{-1} = 436$ МПа, то после

эксплуатации он достигает 500...620 МПа. Это означает, что имеет место повышение сопротивления усталости на 30...40 и даже до 50 %. Такой вывод не является неожиданным, он известен в трибофатике [13, 14].

Предел контактной усталости в процессе эксплуатации вырос на 22...76 %, в зависимости от зоны деформирования, максимальное его повышение отмечено в зоне I.

Наиболее низкий уровень прочности ($\sigma_B = 890$ МПа) имеет нетермоупрочненный рельс до эксплуатации. В процессе эксплуатации предел прочности его материала увеличивается до 1300...1400 МПа. Такие значения характерны для новых объемно или поверхностно термоупрочненных, а также для термически не упрочненных рельсов после эксплуатации. Кроме того, в зоне I предел прочности достигает значений порядка 1600 МПа. Таким образом, эксплуатационное упрочнение исследуемых рельсов оказывается значительным.

Сопоставление полученных результатов с (5) позволяет заключить, что только для зоны I поверхности катания рельса средние значения критериальных характеристик превышают критические значения. Это свидетельствует о возможности перехода рельсовой стали в критическое состояние и, следовательно, появления начальных повреждений именно в зоне I.

Диаграмма механического состояния рельсовой стали после пропуска 210 млн. т брутто, подтверждающая выше предложенный критерий достижения критического состояния рельсовой стали, построена на рис. 3 с использованием результатов измерения твердости после пропуска 210 млн. т брутто (см. рис. 3).

Видно, что средние значения характеристик (HV , σ_{-1} , p_f , σ_B) не превышают установленных в (5) значений, следовательно, критическое состояние материала рельса после пропуска тоннажа 210 млн. т брутто еще не достигнуто.

3. Экспериментальное подтверждение критерия

Микроструктура стали для нового рельса приведена на рис. 4, а; для зоны наибольшего деформирования – зоны I рельса после эксплуатации – на рис. 4, б.

В обоих случаях структура сердцевины образцов характеризуется наличием сорбитообразного перлита, а также отдельных зон мелкопластинчатого перлита. В поверхностном слое зоны I образца рельса, пропустившего 300 млн. брутто т., виден охрупченный поверхностный слой с повышенной плотностью дефектов (см. рис. 4, б).

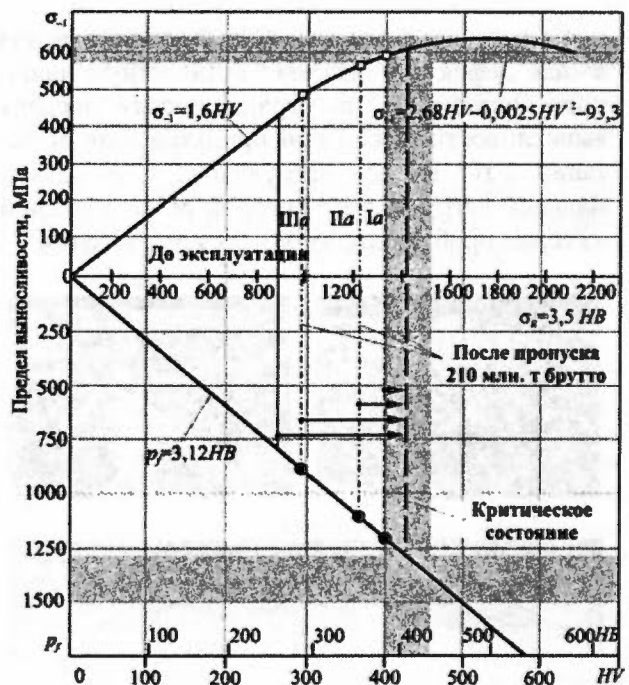


Рис. 3. Диаграмма механического состояния рельсовой стали после пропуска 210 млн т брутто

При дальнейшем исследовании зоны I в сечении поверхности головки рельса, бывшего в эксплуатации, выявлены наклонные трещины (рис. 4, в), которые образовались в процессе эксплуатации. Наблюдается также ряд внутренних трещин, не выходящих на поверхность и ориентированных преимущественно параллельно поверхности (рис. 4, г).

Глубина залегания трещин изменяется от 17 до 210 мкм, а протяженность – от 25 до 2000 мкм. Кроме того, на поверхности головки рельса в зоне I наблюдается поверхностное усталостное выкрашивание (питтинг). Глубина питтинга составляет 2...5 мкм, протяженность – 2...7 мкм. Наряду с этим имеет место трещинообразование в виде мелких извилистых трещин. Таким образом, значительное повышение твердости в зоне I означает сильное упрочнение пластической деформацией тонкого поверхностного слоя головки рельса. Но именно в этой зоне со средней твердостью 480 HV развиваются процессы разупрочнения, предшествующие охрупчиванию и разрушению материала; здесь начинают возникать дефекты. Это убедительно подтверждает правомерность и обоснованность предложенного критерия.

Большое значение при оценке качества рельсов имеют натурные испытания полнопрофильных рельсов при изгибном циклическом нагружении, которые являются общепринятым методом оценки работоспособности [15]. Такие испытания позволяют определить долговеч-

ность работы рельса до момента возникновения в нем дефекта и излома. Усталостную прочность оценивают по ограниченному пределу выносливости (в кН) при принятой базе испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения, т. е. максимальной нагрузке, при которой рельс в каждой из серии проб проходит базу без разрушения.

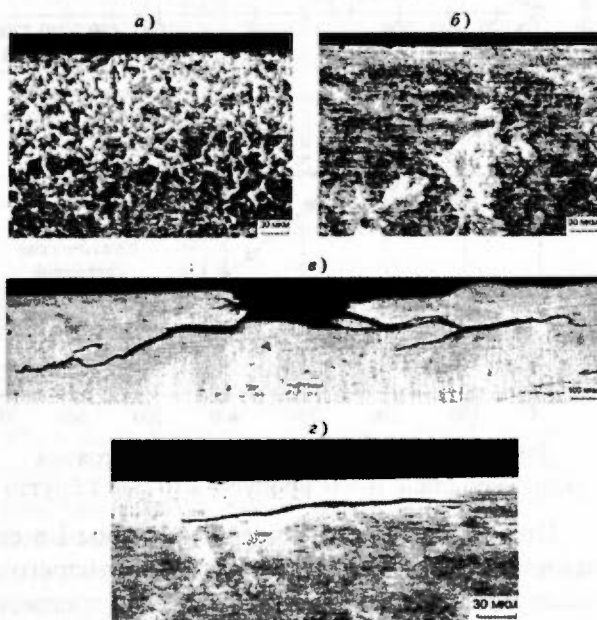


Рис. 4. Микроструктура стали нового рельса (а) и рельса после эксплуатации (б) и типичные усталостные повреждения, обнаруженные в зоне I поверхностного слоя головки рельса (в, г)

Натурные испытания рельсовых проб на циклический изгиб проводили на 100-тонном гидропульсаторе ЦДМ-100 при расположении рельсовых проб головкой в зоне растяжения. Расстояние между опорами составляет 1,0 м. Сосредоточенная нагрузка прикладывалась в середине пролета, асимметрия цикла ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) составляла 0,1. Были испытаны две пробы рельсов типа Р50 производства металлургического комбината "Азовсталь", пропустившие нормативный тоннаж 300 млн. т брутто в прямом участке, при нагрузке 300 и 280 кН, которую рельсовые пробы предположительно должны были выдержать без разрушения. При нагрузке 300 кН (максимальное напряжение составило 304 МПа) проба сломалась после $1,8 \cdot 10^6$ циклов нагружения, а при нагрузке 280 кН (максимальное напряжение – 283 МПа) рельс выдержал без разрушения $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Для подтверждения нагрузки, при которой рельсы выдерживают базовое число циклов, был испытан еще один рельс при 280 кН, который также не разрушился. На основании результатов натурных испытаний, была построена кривая усталости 1, представленная

на рис. 5. Среднее значение предела выносливости исследуемых натуральных рельсов типа Р50 составляет 288 МПа.

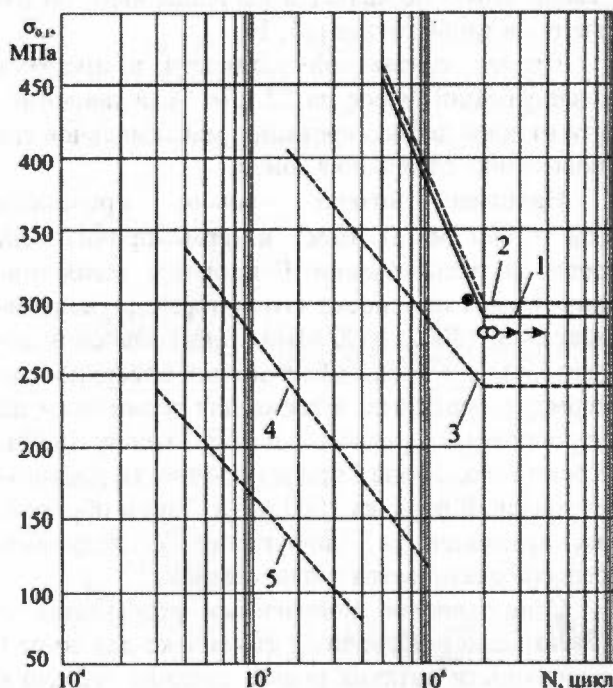


Рис. 5. Кривые усталости для нетермоупрочненных рельсов типа Р50:

1 – после пропуска 300 млн. т брутто; 2 – в состоянии поставки; 3 – при наличии внутренних продольных трещин; 4 – при наличии поперечных усталостных трещин малой площади до 8 % сечения головки; 5 – при наличии больших поперечных усталостных трещин, занимающих до 50...70 % сечения головки

Кривые усталости 2–5 на рис. 5 построены на основании аналогичных исследований нетермоупрочненных рельсов типа Р50 при наличии и развитии в них дефектов [1]. До тех пор, пока в рельсах не образовались внутренние трещины (кривые 1 и 2), накопление усталостных повреждений в поверхностных слоях головки рельса приводит только к небольшому снижению усталостной прочности. При возникновении продольных трещин значение предела выносливости снижается уже до 240 МПа (кривая 3), а при образовании поперечных трещин размером до 5...6 % сечения головки рельса – до 120 МПа (кривая 4). Если площадь трещин превышает более 8 % сечения головки, то предел выносливости не может быть определен по приведенной схеме испытания, так как он составляет менее 70 МПа (кривая 5).

Таким образом, предел выносливости нетермоупрочненных рельсов типа Р50 до эксплуатации составляет в среднем 300 МПа. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что их сопротивление усталости полнопрофильных рельсов после

пропуска 300 млн. т брутто понизилось до 288 МПа, т. е. всего на 4 %, и это подтверждает предложенный критерий оценки предельного состояния рельсовой стали.

4. Перспективы использования критерия

Известно [16], что одним из параметров, которым можно управлять в процессе обработки шлифованием, является твердость на поверхности катания. Этот фактор определяет состояние рельса в процессе эксплуатации или после обработки и его склонность к усталостному разрушению. В связи с этим предлагается использовать разработанный критерий в качестве параметра, регламентирующего назначение шлифования. При помощи переносного твердомера, в эксплуатационных условиях можно определить твердость в зоне контакта рельса и колеса. Если средняя измеренная твердость достигает 400...440 HV (380...420 HB), то усталостная прочность рельсов снижается, а на поверхности катания возникают повреждения. При превышении указанного значения твердости необходимо принятие мер по улучшению механических свойств материала головки рельсов, которые в данном случае характеризуются именно уровнем твердости. Назначение шлифования по предложенному критерию позволит приостановить процессы образования поверхностных дефектов уже в начальном их периоде.

Выводы

1) Предложен общий метод оценки механического состояния стали по критериям изгибной и контактной усталости (во взаимосвязи с твердостью и пределом прочности).

2) Разработана процедура экспрессной расчетно-экспериментальной оценки механического состояния материала головки рельсов, основанная на предложенном методе.

3) Метод и процедура подтверждены экспериментальными исследованиями механического состояния нетермоупрочненных рельсов типа Р50 в процессе эксплуатации (после пропуска 210 и 360 млн т брутто), а также микроструктурным анализом начального повреждения материала на поверхности катания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев Л. П. Содержание и ремонт рельсов. – М.: Транспорт, 1984. – 231 с.
2. Повышение эффективности и надежности работы рельсов: Сб. науч. тр. / Под ред. Л. Г. Крысанова.

– М.: Транспорт, 1990. – 133 с.

3. Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: Сб. науч. тр. / Под ред. Л. Г. Крысанова. – М.: Интекст, 2000. – 142 с.

4. Неметаллические включения в рельсовой стали: Сб. науч. тр. / Под ред. Л. А. Смирнова. – Екатеринбург: ГНЦ РФ ОАО «УИМ», 2005. – 151 с.

5. Богданов В. М., Захаров С. М. Современные проблемы системы колесо/рельс // Железные дороги мира – 2004. – № 1. – С. 57–62.

6. Шур Е. А. К вопросу об оптимальном соотношении твердости колес и рельсов // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути: сб. докл. науч.-практ. конф. / – М.: Интекст, 2003. – С. 87–93.

7. Кебиков А. А. Экспериментальные исследования остаточных свойств материала рельсов // ТРИБОФАТИКА: Сб. докл. V Междунар. симп. по трибофатике. ISTF-2005. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – Т.1. – С. 484–494.

8. Сосновский Л. А., Об одном критерии состояния рельсов после наработки нормативного тоннажа / Л. А. Сосновский, А. А. Кебиков // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / Отв. ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2005. – Т. 2. – С. 322–323.

9. Термически упрочненные рельсы; под ред. А. Ф. Золотарского – М.: Транспорт, 1976. – 264 с.

10. Сусин А. А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей. – Мн.: Белорусская наука, 1999. – 175 с.

11. Хейвуд Р. Проектирование с учетом усталости. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.

12. Трощенко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник/ В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский – Т. 1, 2. – Киев: Наукова думка, 1987. – 510 с., 825 с.

13. Сосновский Л. А. Износоусталостные повреждения и предельное состояние силовой системы типа колесо/рельс // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2001. – № 2. – С. 100–104.

14. Sosnovskiy L. A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). – Springer. – 2004. – 424 p.

15. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. – М.: Металлургия, 1978. – 302 с.

16. Тихомирова Л. Б. Влияние условий механической обработки на кинетику зарождения и распространения усталостных трещин в головке рельса / Л. Б. Тихомирова, А. С. Ильиных // Материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Красноярск, 2005. – С. 288–292.

Надійшла до редколегії 24.05.07.