

расчета, учитывающих неоднородность свойств материала в зависимости от вида ИУП, характера нагруженности, типа силовой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1 Сосновский, Л.А. Основные закономерности износоусталостных повреждений /Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, О.М. Еловой и др. // Материалы II Белорусского конгресса по теор. и прикл. механике. Под ред. акад. М.С. Высоцкого. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – С. 121 – 122. 2 Еловой, О.М. Методы и некоторые результаты измерения параметров износоусталостного повреждения в дискретных точках / О.М. Еловой // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2001. – № 4. – С.32 – 36. 3 Еловой О. М. Измерение и регистрация дискретных параметров износоусталостных повреждений моделей силовых систем мобильной техники / Тр. 4-го Междунар. симп. по трибофатике, 23 – 27 сент. 2002 г., Тернополь, Украина / отв. ред. В.Т. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский гос. техн. ун-т им. И. Пулюя, 2002. – Т.1. – С. 128 – 133. 4 Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учеб. пособие для студентов вузов: В 2 ч. /Л.А. Сосновский – Гомель: БелГУТ, 2003. – Ч.1. – 246 с.; Ч.2. – 235 с. 5 Дюмин, И.Е. Повышение эффективности ремонта автомобильных двигателей / И.Е. Дюмин. – М.: Транспорт, 1987. – 176 с. 6 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель: УО «БелГУТ», 2007. – 434 с.

УДК 625.143

Сосновский Л. А., Матвеев В. И., Кебилов А. А.

КРИТЕРИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

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 (HB) 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]:

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

Объединим зависимости (1) и (2) на рисунке 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 [11–13], можно получить зависимости, показанные в верхней половине рисунка 1. Видно, что прямая

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

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 рисунка 1, аппроксимирует, в первом приближении, кривая, уравнение которой

$$\sigma_{-1} = 2,68HV - 0,0025(HV)^2 - 933. \quad (4)$$

Общее заключение, которое следует из анализа рисунка 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

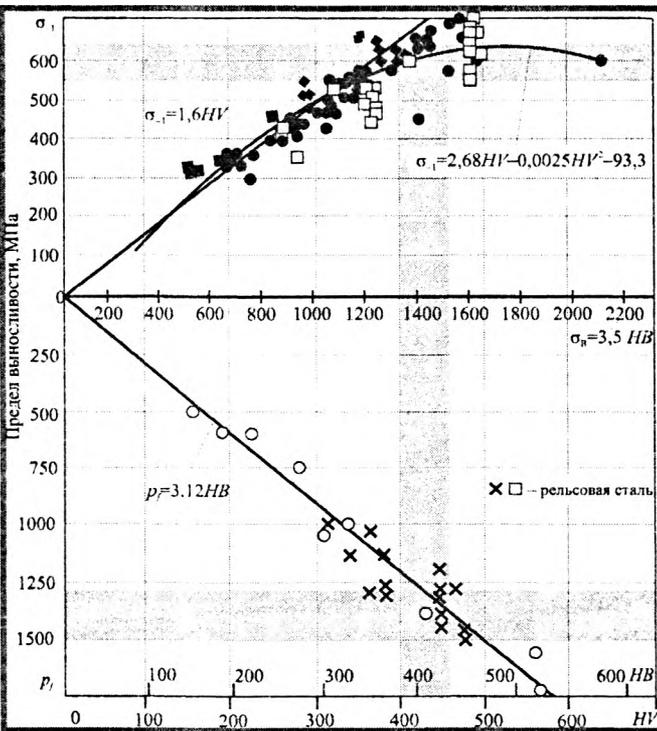


Рисунок 1 – К анализу взаимосвязей характеристик сопротивления усталости, твердости и предела прочности

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 рисунке 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 $pf(HB)$. Процессы упрочнения будут иметь место только до тех пор, пока для зависимости $\sigma-1(HV)$ не наступит переход в критическую область (затемнено на рисунке 1). Это область начала поверхностного разрушения. Следовательно, рисунок 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

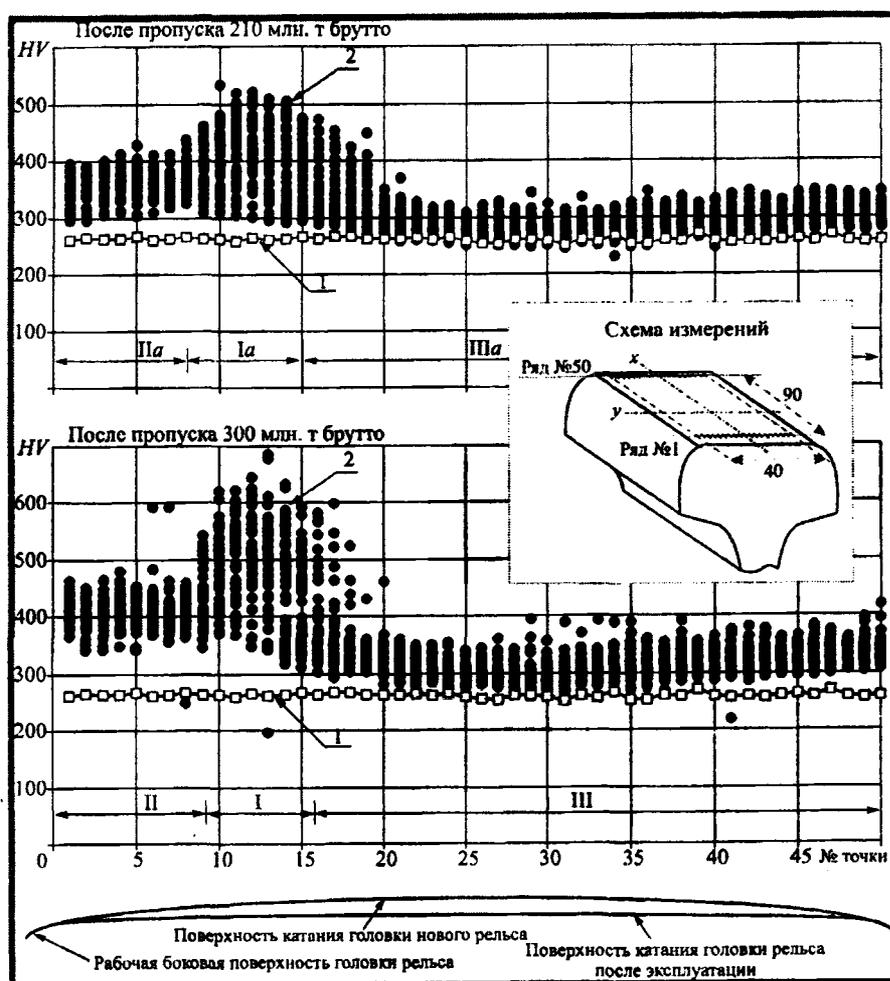


Рисунок 2 – Распределение по поверхности головки рельса из прямого участка твердости HV после пропуска 210 и 300 млн. т брутто 1 – средняя твердость до эксплуатации, 2 – твердость после эксплуатации

матрице (5) и на рисунке 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. Образец устанавливали на предметном столе твердомера так, чтобы диагонали отпечатка пирамиды были ориентированы строго по продольному и поперечному направлениям головки рельса. Схема измерений на поверхности катания рельса представлена на рисунке 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. рисунок 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 таблице.

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 твердость 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.

Если предел выносливости до эксплуатации в среднем составлял $\sigma_{-1} = 436$ МПа, то после эксплуатации он достигает значений 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 [14–17].

Таблица – Средние значения твердости HV, характеристик сопротивления усталости и предела прочности

Состояние рельсовой стали						
до эксплуатации	после пропуска 210 млн. т брутто			после пропуска 300 млн. т брутто		
	зона IIIa	зона IIa	зона Ia	зона III	зона II	зона I
Твердость по Виккерсу \overline{HV}						
261	292	361	396	320	410	480
Предел выносливости $\overline{\sigma_{-1}}$, МПа						
436	476	548	576	506	584	612
Предел контактной усталости $\overline{p_f}$, МПа						
793	885	1090	1190	969	1235	1399
Предел прочности $\overline{\sigma_b}$, МПа						
890	995	1225	1340	1090	1380	1590

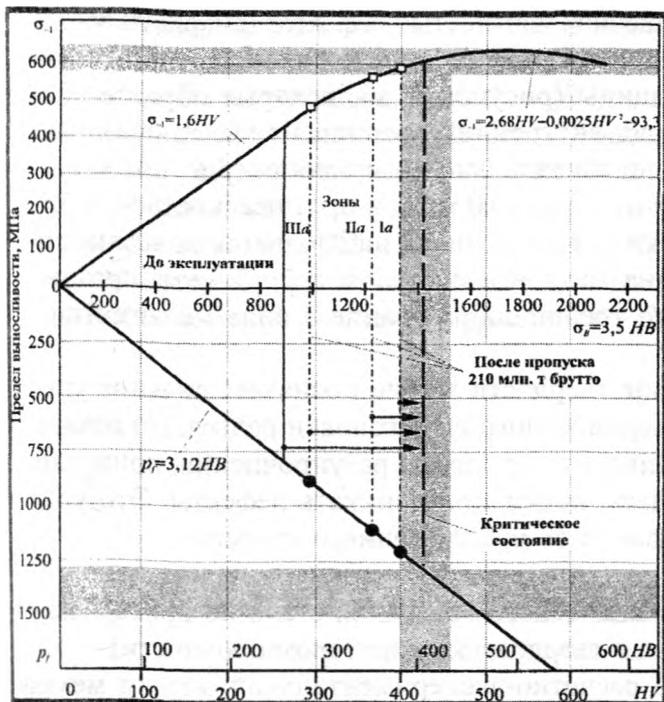


Рисунок 3 – Диаграмма механического состояния рельсовой стали после пропуска 210 млн. т brutto

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 brutto, подтверждающая выше предложенный критерий достижения критического состояния рельсовой стали, построена на рисунке 3 с использованием результатов измерения твердости после пропуска 210 млн. т brutto (см. рисунок 2). Видно, что средние значения характеристик (HV, σ_{-1} , r_f , σ_B) не превышают установленных в (5) значений, следовательно, критическое состояние материала рельса после пропуска тоннажа 210 млн. т brutto еще не достигнуто.

3 Экспериментальное подтверждение критерия. Микроструктура стали для нового рельса приведена на рисунке 4, а; для зоны наибольшего деформирования – зоны I рельса после эксплуатации – на рисунке 4, б.

В обоих случаях структура сердцевинки образцов характеризуется наличием сорбитообразного перлита, а также отдельных зон мелкопластинчатого перлита. В поверхностном слое зоне I образца рельса, пропустившего 300 млн. т brutto т.,

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

Наиболее низкий уровень прочности ($\sigma_B = 890$ МПа) имеет исследуемый 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 данных экспериментальных исследований с матрицей (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.

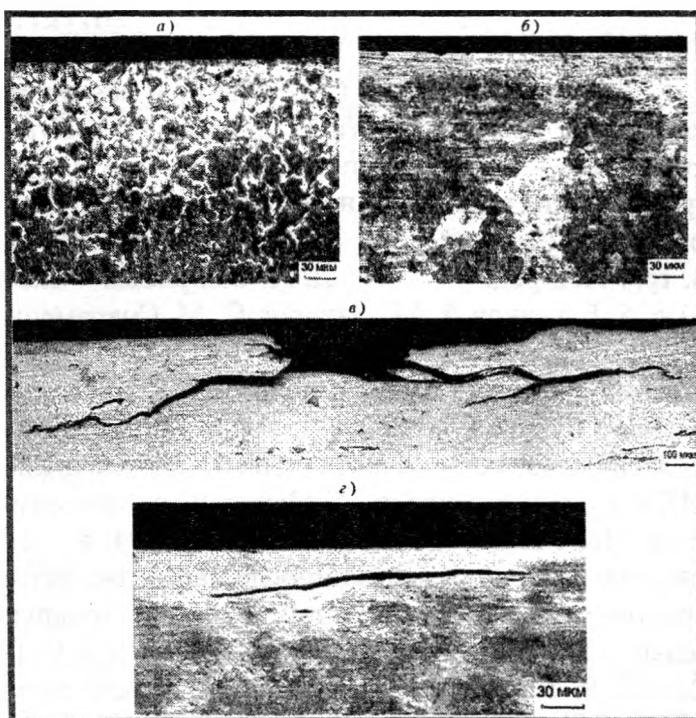


Рисунок 4 – Микроструктура стали нового рельса (а) и рельса после эксплуатации (б) и типичные усталостные повреждения, обнаруженные в зоне I поверхностного слоя головки рельса (в, г)

виден охрупченный поверхностный слой с повышенной плотностью дефектов (см. рисунок 4, б).

При дальнейшем исследовании зоны I в сечении поверхности головки рельса, бывшего в эксплуатации, выявлены наклонные трещины (рисунок 4, в), которые образовались в процессе эксплуатации. Наблюдается также ряд внутренних трещин, не выходящих на поверхность и ориентированных преимущественно параллельно поверхности (рисунок 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, приводящее к охрупчиванию и разрушению материала; здесь начинают возникать дефекты. Это убедительно подтверждает правомерность и обоснованность предложенного критерия.

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 в процессе эксплуатации, 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.

ЛИТЕРАТУРА

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. Кебилов А. А. Экспериментальные исследования остаточных свойств материала рельсов // ТРИБОФАТИКА: Сборник докладов V Международного симпозиума по трибофатике. ISTF-2005. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – Т.1. – С. 484–494. 8. Л. А. Сосновский, А. А. Кебилов Об одном критерии состояния рельсов после наработки нормативного тоннажа // 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., Сосновский Л. А. Сопrotивление усталости металлов и сплавов: справочник. – Т. 1, 2. – Киев: Наукова думка, 1987. – 510 с., 825 с. 13. Сосновский Л. А. Механика усталостного разрушения: словарь-справочник. – Т. 1, 2. – Гомель: НПО “ТРИБОФАТИКА”, 1994. – 328 с., 340 с. 14. Сосновский Л. А. и др. Диаграмма предельных состояний стали 45 при контактно-механической усталости // Заво-

ская лаборатория. – 1996. – Т. 72. – № 2. – С. 39–42. 15. Сосновский Л.А. Износоусталостные повреждения и предельное состояние силовой системы типа колесо/рельс // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2001. – № 2. – С. 100–104. 16. Sosnovskiy L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). – Springer. – 2004. – 424 p. 17. Сосновский Л. А. и др. Общий подход к оценке интенсивности повреждения при циклическом деформировании, трении и комплексном нагружении // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 2. – С.38-40. 18. Андрияшин В. А. и др. Изменение состояния материала нетермоупрочненных рельсов при эксплуатации в условиях Минского метрополитена // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2005. – № 2. – С. 98–113.

УДК 519.28:620.171

Сосновский Л. А., Щербаков С. С.

АНАЛИЗ ТРЕНИЯ В СИЛОВОЙ СИСТЕМЕ

ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» Гомель, Беларусь
Белорусский государственный университет Минск, Беларусь

Силовая система представляет собой, по существу, пару трения, в которой хотя бы один из элементов находится под воздействием внеконтактной циклической нагрузки (рисунок 1) [1, 2]. К настоящему времени разработано три подхода к анализу трения в силовой системе.

(1) Сила трения в силовой системе может рассматриваться как некоторая функция обычной силы трения, например, при скольжении F_S , которая возникает в окружном направлении (объект – пара трения), и *циклической составляющей* F_C силы трения, которая дополнительно возникает вследствие возбуждения циклических напряжений (деформаций) в осевом направлении (см. рисунок 1) [2, 3].

Согласно первому подходу трение в силовой системе можно описать четырьмя отдельными (независимыми) характеристиками:

– сила трения при скольжении (закон Амонтона)

$$F_S = f_S F_N = \tau_w A_a = \gamma_S G A_a, \quad (1)$$

– коэффициент трения при скольжении

$$f_S = \frac{F_S}{F_N} = \frac{\tau_w A_a}{F_N} = \frac{\tau_w}{p_a} = \frac{\gamma_S G}{p_a}, \quad (2)$$

– *циклическая сила трения*

$$\pm F_C(t) = f_C(t) F_N = \sigma(t) A_a = \varepsilon(t) E A_a = M(t) \frac{A_a}{W}, \quad (3)$$

– *циклический коэффициент трения*

$$\pm f_C(t) = \frac{F_C(t)}{F_N} = \frac{\sigma(t) A_a}{F_N} = \frac{\varepsilon(t)}{p_a} = \frac{M(t) A_a}{F_N W}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) f_S – коэффициент трения в трибологической паре; F_N – контактная нагрузка; p_a – номинальное контактное давление; $\tau_w = f_S p_a$ – удельная сила трения, или фрикционное напряжение; A_a – номинальная площадь контакта; γ_S – относительный сдвиг; G – модуль сдвига; $\sigma = M / W$ – наибольшее циклическое напряжение; ε – относительная деформация (растяжения – сжатия); E – модуль нормальной упругости; M – изгибающий момент; W – момент сопротивления изгибу.