

УДК 621.014.539.4

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР НА РЕСУРС МАТЕРИАЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Григорьев А.В., Лепов В.В.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
Якутск, e-mail: gregor1212@mail.ru*

В процессе эксплуатации локомотивные колеса подвергаются воздействию различных нагрузок. Колесная сталь данного узла локомотива находится в сложном напряженном состоянии, в ней развиваются внутренние и поверхностные дефекты, накапливаются повреждения от усталостных и ударных малоцикловых нагрузок, развиваются пластические деформации. Железная дорога, расположенная на территории Республики Саха (Якутия), отличается низкими климатическими температурами и резкой континентальностью, период температур ниже 0°C составляет около 210 суток и минимальная температура достигает 60°C ниже нуля, разность средних температур составляет более 70°C. Относительная влажность воздуха изменяется в течение года в широких пределах, наиболее высокая относительная влажность отмечается в декабре-феврале, что соответствует минимуму температуры. Большая часть территории Республики Саха (Якутии) относится к районам многолетнемерзлых грунтов. Такие негативные климатические факторы в значительной степени обуславливают снижение эффективности эксплуатации технических сооружений и оборудования в условиях Крайнего Севера, включая железнодорожный транспорт. В статье исследован процесс накопления поврежденности в материале, описана методика оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса, эксплуатируемого в условиях низких климатических температур Центральной Якутии. Предложен критерий разрушения, учитывающий как усталостный характер, так и ударное воздействие на чувствительный к снижению температуры эксплуатации при прохождении рельсовых стыков процесс накопления повреждений.

Ключевые слова: разрушение, поврежденность, бандаж локомотивного колеса, ударная вязкость, ресурс

INFLUENCE OF LOW CLIMATIC TEMPERATURES ON THE RESOURCE OF THE MATERIAL OF RAILWAY WHEELS

Grigorev A.V., Lepov V.V.

*Larionov's Institute of physical and technical problems of the North SB RAS, Yakutsk,
e-mail: gregor1212@mail.ru*

The locomotive wheels are exposed to influence of various loadings during operation. Material of the wheel of this locomotive element is merged in the complex stress state. So the internal and superficial defects are developed and damage plastic deformation and difficult tension takes place. The railroad located on territory of the Republic of Sakha (Yakutia), is distinguished by low climatic temperatures and acutely continental climate, where the period of subzero lasts about 210 days and the minimum of temperature reaches 60°C below zero, and difference of the average temperatures achieve more than 70°C. Relative humidity of air changes within a year over a wide range, and the highest relative humidity is noted in December-February that corresponds to temperature minimum. The most part of territory of the Republic of Sakha (Yakutia) belongs to regions of permafrost soil. Such negative climatic factors substantially cause decrease in efficiency of operation of technical constructions and the equipment in the conditions of Far North, including railway transport. In article the process of damage accumulation in material is studied, and the technique of an assessment of the damage and a lifetime of a bandage of the locomotive wheel operated in the conditions of low climatic temperatures is described. The calculation and experimental technique of an assessment of damages accumulation and the method of lifetime of the locomotive wheel bandage is given. The criterion of fracture considering both the fatigue nature and shock influence when passing the rail joints on the process of damage accumulation, is offered. The shock influence is significantly sensitive to low temperature during operation.

Keywords: fracture, damage, locomotive tire, impact toughness, lifetime

При эксплуатации железнодорожной техники в условиях аномально низких климатических температур существенно падают показатели безопасности и экономической эффективности и, как правило, растет ресурсо- и энергоёмкость перевозок. Особенную актуальность данная проблема приобретает с учетом строительства новых участков железной дороги и повышения грузооборота. Одним из наиболее ответственных узлов железнодорожной техники являются колесо и рельс. Их долговечность и надежность существенно влияют на эксплуатационные расходы, а разрушения недопустимы, так как создают непосредственную угрозу безопасности движения.

Объектом исследований, выполненных в данной работе, является материал бандажа локомотивного колеса, который выработал свой ресурс при эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

В результате проведенных исследований повреждаемости бандажей локомотивных колес установлено преобладание повреждений контактно-усталостного характера, таких как выщербины, выкрашивания, раковины на поверхностной части данного узла [2]. Такие дефекты на поверхности катания могут развиваться от поверхности вглубь металла, тем самым спровоцировать выход детали из строя, при неблагоприятных обстоятельствах приводящий к аварии или

крушению поезда. Также из-за частых случаев образования таких дефектов снижается ресурс детали, повышаются экономические расходы. Как показали испытания, описанные в работе [3], механические свойства материала бандажа локомотивного колеса при низких температурах ухудшаются. Предел текучести повышается, а относительное удлинение существенно падает, происходит потеря пластичности – охрупчивание материала. Также от контакта с рельсом на поверхности катания образуется слой наклепанного (поврежденно-пластически деформированного) материала глубиной 3–4 мм.

Материал и методы исследования

В процессе эксплуатации бандаж локомотивного колеса подвергается как механическим усталостным, так и ударным (динамическим) нагрузкам от рельсовых стыков и неровностей самой поверхности катания. Таким образом, возникает необходимость определения сопротивления материала действию таких ударных нагрузок и количественного расчета накапливаемых в нем повреждений. Одним из распространенных методов оценки сопротивления материала действию ударных нагрузок являются испытания на ударный изгиб [4]. Поскольку бандаж локомотивного колеса эксплуатируется в широком диапазоне рабочих температур, то принципиальным является исследование ударной вязкости материала бандажа как при положительных (20°C), так и при отрицательных температурах (-20°C, -40°C, -60°C).

Результаты испытаний на ударную вязкость

T, °C	KCV, Дж/см ²
-60	0,70
	0,58
	0,74
	0,51
	0,67
Среднее значение	0,62
-40	0,71
	0,54
	0,96
Среднее значение	0,73
-20	1,33
	1,37
	1,38
Среднее значение	1,36
20	2,29
	1,75
	1,69
	1,72
	1,64
Среднее значение	1,82

Результаты испытаний представлены в таблице. Значение ударной вязкости материала бандажа при температуре испытаний -60°C падает в три раза. Таким образом, несмотря на высокие показатели прочности, материал при низкой температуре становится существенно хрупким, тем самым снижается его сопротивление действию ударных нагрузок.

С другой стороны, уже при температуре -40°C наблюдается наибольший разброс величин ударной вязкости, что, собственно, и характеризует момент перехода в хрупкое состояние. Таким образом, ударные воздействия, производимые на бандаж локомотивного колеса при рабочей температуре близкой к -40°C и ниже, будут приводить к сильной локализации пластических деформаций и образованию микро- и макротрещин по механизму откола или отслаивания. Процесс накопления повреждений будет проходить в ускоренном режиме и приводить к снижению общего ресурса локомотивных колес.

Экспериментальное определение характеристик долговечности бандажа локомотивного колеса является достаточно сложной задачей. При определении поврежденности бандажа локомотивного колеса с учетом различных условий эксплуатации существует ряд трудностей и поэтому возникает необходимость различного рода упрощений и схематизации реального процесса нагружения.

Процесс эксплуатации элементов железнодорожной техники, в частности бандажа локомотивного колеса, состоит из повторяющихся циклов нагружения. В данной работе рассчитано количество циклов до разрушения (образования недопустимого выкрашивания или откола на поверхности катания). Используя зависимость, полученную в работе [6], и ранее определенные механические характеристики материала бандажа локомотивного колеса [3], вычислено количество циклов до разрушения:

$$N = 2,603 \cdot 10^{11} \tau_{DV}^{-2,5}, \tag{1}$$

где τ_{DV} – эквивалентное напряжение, по критерию Данг Вана [7].

Круговой контакт при максимальном давлении $p_0 = 1000$ МПа содержит точку с наибольшими касательными напряжениями τ_{max} , равными $0,32p_0$, которая располагается на оси z , проходящей от центра контактного пятна на глубине $0,5a$, где a – радиус пятна контакта [1]. Нормальные напряжения в ней равны $\sigma_x = \sigma_y = -0,18p_0$, $\sigma_z = -0,8p_0$.

Подставляя полученные величины в уравнение для эквивалентного напряжения [6], получим:

$$\tau_{DV} = \tau_{max}^a + a_{DV} \sigma_0 = \frac{1}{2} 32 p_0 - 0,2 \cdot 0,387 p_0 = 77,6 \text{ МПа.} \tag{2}$$

Согласно (2) в условиях низких климатических температур для данной стали цикл будет являться повреждающим, только если эквивалентные касательные напряжения превысят значение 77,6 МПа. Число циклов до разрушения N согласно (1): $N = 3,88 \cdot 10^6$. Таким образом, материал бандажа локомотивного колеса накапливает усталостные повреждения, сочетающиеся с малоцикловыми ударно-контактными, что наряду с воздействием низких климатических температур обуславливает его ранний выход из строя.

В связи с тем что перепады температуры окружающей среды в условиях Крайнего Севера составляют более 70°C, необходимо сопоставить значения ударной вязкости, полученные в результате

вышеописанных испытаний на ударный изгиб с данными по температуре.

Согласно данным метеослужбы Республики Саха (Якутия) перепады температуры окружающей среды составляют более 70°C . Сопоставляя значения ударной вязкости, полученные в результате вышеописанных испытаний на ударный изгиб с данными по температуре, получаем, что в зимнее время материал бандажа локомотивного колеса подвергается большим температурным напряжениям.

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость ударной вязкости и кривая после сплайновой аппроксимации. Резкое снижение данной характеристики в диапазоне температур $-45\dots-35^{\circ}\text{C}$ свидетельствует о низкой сопротивляемости отрыву при динамических воздействиях. В таких условиях будет происходить накопление повреждений по механизму образования и роста пор и микротрещин, ведущее к разрушению [5].

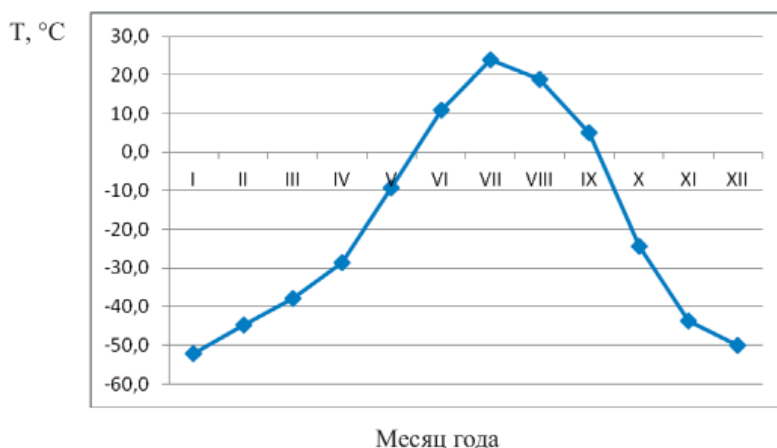


Рис. 1. Средние значения температуры окружающей среды по шкале Цельсия в г. Томмот, Республика Саха (Якутия)

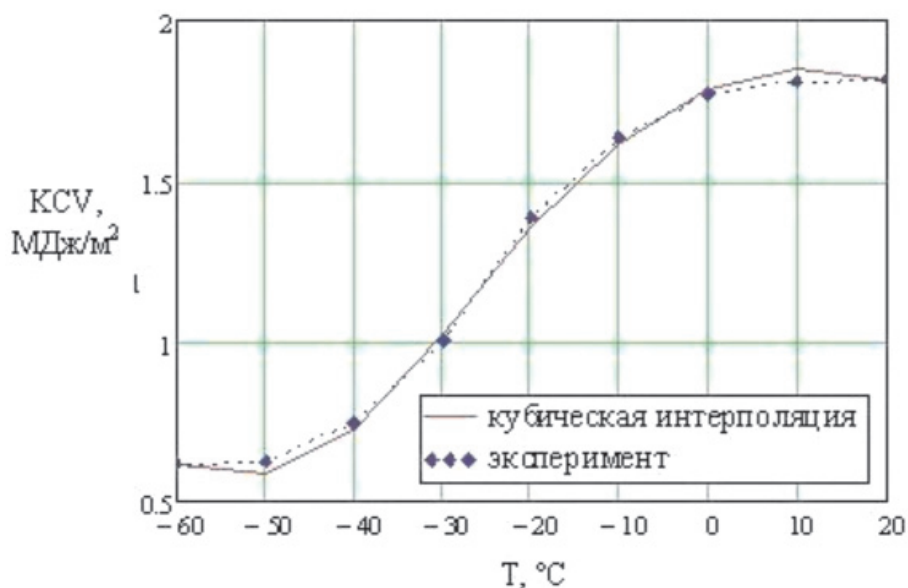


Рис. 2. Сплайн интерполяция зависимости значения ударной вязкости от температуры

Результаты исследования и их обсуждение

Ударная нагрузка значительно ухудшает условия работы бандажа локомотивного колеса и приводит к возникновению ряда опасных повреждений. Помимо усталости металла, такие неблагоприятные условия

эксплуатации могут явиться причиной разрушения бандажа колеса и привести к крушению подвижного состава. Учитывая, что средняя длина одного рельса в пути составляет ~ 20 м, количество циклов до разрушения при воздействии ударного нагружения составит $6 \cdot 10^5$, что соответствует малоциковому повреждению.

На основе проведенных в данной статье экспериментальных и расчетных исследований предложена инженерная методика оценки ресурса для бандажа локомотивного колеса по следующей схеме (рис. 3):

- 1) с использованием функции (1) вычисляется общее количество циклов до разрушения;
- 2) из рассчитанного ранее общего числа циклов определяется пробег до образова-

ния на поверхности дефекта недопустимого размера, согласно формуле (3);

3) используя функцию (4), рассчитывается общее количество обточек, произведенных по причине образования дефекта недопустимых размеров;

4) расчет ресурса бандажа локомотивного колеса осуществляется по формуле (5).



Рис. 3. Алгоритм расчета ресурса бандажа локомотивного колеса

Посредством предложенной в данной статье методики оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса произведен расчет ресурса реального узла, эксплуатируемого на железной дороге Республики Саха (Якутия). В соответствии с приведенной схемой определено, что:

1. Расчетная сумма количества циклов N от усталостного и квазистатического ударного нагружения составляет $4,48 \cdot 10^6$.
2. Исходя из расчетного количества циклов, пробег L до образования на поверхности катания бандажа локомотивного колеса будет равным 14785 км.
3. Число обточек бандажей за весь срок его службы n по формуле (4), где полезная толщина нового бандажа S при расчетах принимается равным 40 мм, а глубина слоя металла, снимаемого при обточке по причине недопустимого повреждения,

$\Delta = 4,8$ мм, составит $n = 8,33$, т.е. всего 8 технологических ремонтных обточек;

4. При выполнении условий по данной схеме определяется ресурс (срок службы) бандажа локомотивного колеса, равный соответственно (5) $T = 123\ 159$ км.

Выводы

Разработанная методика расчета ресурса бандажа локомотивного колеса позволяет определить пробег до момента образования поверхностного повреждения браковочного размера. Вычисленный пробег для материала бандажа колеса, эксплуатируемого на участке железной дороги Алдан–Томмот в условиях низких климатических температур, оказался равен 123 159 км, что в 2–3 раза меньше, чем фиксируемый пробег бандажа в регионах с умеренным климатом, и в 4–5 раз –

гарантированного заводского пробега для нового бандажа.

Таким образом, обоснованная экспериментальными исследованиями расчетная методика определения ресурса бандажа позволяет спрогнозировать остаточный ресурс такого наиболее важного с точки зрения безопасности движения элементов железнодорожной техники, как локомотивное колесо и колесная пара локомотива в целом.

Следует подчеркнуть, что в современной перспективе развития транспорта на Дальнем Востоке и в Сибири, в арктической зоне работы в области прогнозирования жизненного цикла локомотивных колес в экстремальных климатических условиях позволяют значительно повысить показатели безопасности и экономической эффективности таких проектов за счет уменьшения расходов, связанных с возрастанием риска отказов, и в целом снижают угрозу безопасности движения.

Список литературы

1. Беляев Н.М. К вопросу о местных напряжениях в связи с сопротивлением рельсов смятию // Труды по теории упругости и пластичности – 1957. – С. 215–260.
2. Григорьев А.В., Лепов В.В. Контактно-усталостные повреждения колес локомотива, эксплуатируемого в условиях Севера / Ресурс и диагностика материалов и конструкций: материалы V Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург: (электронный ресурс). / Екатеринбург: ИМАШ УРО РАН, 2011. / Электрон. оптич. диск, вкладка «Публикации».
3. Григорьев А.В., Лепов В.В. Механизмы накопления повреждений и разрушения материала обода железнодорожного колеса при эксплуатации в условиях Севера // Вестник Северо-Восточного федерального университета. – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 79–85.
4. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
5. Лепов В.В., Дерюгин Е.Е., Алымов В.Т., Ларионов В.П. Предельное состояние материала и элементов конструкций: новые подходы // Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы /

В.П. Ларионов, В.Р. Кузьмин, О.И. Слепцов и др.; отв. ред. В.В. Филиппов; ИФТПС СО РАН. – Новосибирск: Наука: Сиб. изд. фирма, 2005. – 290 с.

6. Сакало А.В.. Контактно-усталостная прочность колёсной стали // Вестник БГТУ. – Брянск: БГТУ, 2011. – № 2. – С. 35–41.

7. Ekberg A. Rolling contact fatigue of railway wheels – computer modeling and in-field data // Pro-ceedings of 2nd mini conference «Contact mechanics and wear of rail/wheel systems». – Budapest, 1996. – P. 154–163.

References

1. Belyaev N.M. K voprosu o mestnykh napryazheniyah v svyazi s soprotivleniem relsov smyatiyu / N.M. Belyaev // Trudy po teorii uprugosti i plastichnosti 1957. pp. 215–260.
2. Grigorev A.V., Lepov V.V. Kontaktно-ustalostnye povrezhdeniya koles lokomotiva, expluatiruemogo v usloviyah Severa / Materialy V Rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii «Resurs I diagnostika materialov I konstrukciy» / Ekaterinburg: (electronniy resurs) / Ekaterinburg:IMASH URO RAN, 2011 / Electron. Optich. disk, vkladka «Publikacii».
3. Grigorev A.V., Lepov V.V. Mechanizmy nakopleniya povrezhdeniy I razrusheniya materiala oboda zheleznodorozhnogo koleasa pri expluatacii v usloviyah Severa.//Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta. 2012. T. 9. no. 1. pp. 79–85.
4. GOST 9454-78. Metally. Metod ispytaniya na udarniy izgib pri ponizhennykh, komnatnoy I povyshennykh temperaturah.
5. Lepov V.V., Deryugin E.E., Alymov V.T., Larionov V.P. Predelnoe sostoyanie materiala I elementov konstrukciy: novye podhody / V sb. Khladostoykost materialov I elementov konstrukciy: rezultaty I perspektivy / V.P. Larionov, V.R. Kuzmin, O.I. Sleptsov I dr.; отв. red. V.V. Filippov; IFTPS SO RAN. Novosibirsk: Nauka: Sib. izd. firma, 2005. 290 p.
6. Sakalo A.V. Kontaktно-ustalostnaya prochnost kolesnoy stali // Vestnik BGTU. Bryansk: BGTU, 2011. no. 2. pp. 35–41.
7. Ekberg A. Rolling contact fatigue of railway wheels computer modeling and in-field data // Pro-ceedings of 2nd mini conference «Contact mechanics and wear of rail/wheel systems». Budapest, 1996. pp. 154–163.

Рецензенты:

Бондарев Э.А., д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе, Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск;
 Левин А.И., д.т.н., зав. сектором ритмологии отдела РЭСТ Якутского научного центра СО РАН, г. Якутск.
 Работа поступила в редакцию 26.02.2014.