

Повреждения и ресурс колес локомотивов, эксплуатируемых в условиях Севера

02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0699140

Григорьев А. В., Лепов В. В.

УДК 621.014.539.4

Институт физико-технических проблем севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г.Якутск

greegor1212@mail.ru

lepov@iptpn.ysn.ru

Введение

В процессе эксплуатации железнодорожной техники, в частности, таких элементов, как колесо и рельс, происходит накопление повреждений различного характера, обуславливающих преждевременный выход техники из строя. При этом актуальной проблемой остается анализ механизмов и моделирование процессов накопления повреждений и разрушения как на поверхности, так и в объеме материала. Основной целью работ в данном направлении является исследование закономерностей процесса накопления повреждений от совместного действия различных факторов, которое усиливается в условиях низких климатических температур, количественная оценка повреждений, приводящих к преждевременной выработке ресурса, и разработка соответствующих мер по снижению неблагоприятных последствий этого.

Территория Республики Саха (Якутия), по которой проходит железная дорога, отличается резко-континентальным климатом с низкими температурами в зимний и весенний периоды, температуры ниже 0° С в среднем сохраняются около 210 суток, а минимальная температура достигает —60° С, разность средних температур между сезонами составляет более 60° С. Относительная влажность воздуха изменяется в течении года в широких пределах, наиболее высокая относительная влажность отмечается в декабре-феврале, что соответствует минимуму температуры. Большая часть территории Республики Саха (Якутии) относится к криолитозоне с многолетнемерзлыми грунтами.

Для оценки поврежденности колесных пар тепловозов локомотивного парка предприятия ОАО АК «Железные дороги Якутии» г. Алдан Республика Саха (Якутия) проведен сбор и анализ данных по дефектным колесным парам, подлежащим обточке. С этой целью исследованы три магистральных тепловоза марки: 2ТЭ10М-2235, 3ТЭ10М^К-2795, GE-0884 и один маневровый ТЭМ2-5010. Все тепловозы имеют различные технические характеристики и эксплуатационные нагрузки.

В результате проведенных исследований повреждений бандажей локомотивных колес установлено преобладание контактно-усталостных дефектов, таких как выщербины, выкрашивания, раковины на поверхностной части бандажа локомотивного колеса [1]. Такие дефекты на поверхности катания развиваются от поверхности вглубь металла, тем самым обуславливая выход детали из строя, и при неблагоприятных обстоятельствах ведут к аварии или крушению поезда. Также, из-за частых случаев образования таких дефектов, снижается средний ресурс деталей и повышаются экономические расходы на их приобретение. Как показали механические испытания [2], свойства материала бандажа локомотивного колеса пластически компенсировать возникающие деформации при низких температурах ухудшаются. Хотя предел текучести несколько повышается, относительное удлинение существенно падает, и происходит потеря пластичности, материал «охрупчивается». Также от контакта с рельсом на поверхности катания образуется характерный наклеп глубиной 3-4 мм, характеризующийся повышенными значениями прочностных свойств и становящийся концентратором дополнительных напряжений.

В настоящее время одной из важнейших задач на транспорте становится увеличение срока службы машин, конструкций и их элементов, основанное на расчете остаточного ресурса и прогнозе дальнейшей работоспособности. При расчете ресурса конструкций возникает задача описания процессов накопления повреждений. Таким образом, прогнозирование достижения предельного состояния и расчет остаточного ресурса машин и конструкций тесно связано с необходимостью создания модели, описывающей процесс разрушения в материале образца.

Объектом исследований, выполненных в данной работе, является бандаж локомотивного колеса, который в процессе эксплуатации подвергается циклическим ударным (динамическим) нагрузкам. В этой связи возникает необходимость как определения сопротивления материала действию таких ударных нагрузок, так и количественного расчета накапливаемых в нем повреждений.

2. Материалы и методика эксперимента.

Процесс эксплуатации железнодорожного колеса состоит из повторяющихся циклов нагружения. В данном случае будем считать количество циклов до разрушения (образования выкрашивания или откола на поверхности катания бандажа локомотивного колеса);

Накапливаемые усталостные повреждения приписывались одному радиальному сечению колеса, которое контактировало с рельсом один раз за один оборот колеса. Следовательно, за один оборот колесо испытывает один цикл нагружения. Как установлено [1], средний пробег локомотивов до образования недопустимых повреждений на поверхности катания L_{cp} составляет 12 тыс. км. Количество циклов N_1 на один километр пути, при среднем диаметре колеса локомотива $D = 1050$ мм, будет составлять 303 циклов на 1 км рельсового пути.

Предельное число циклов составит:

$$N = N_1 \times L_{cp}, \quad (1)$$

Таким образом, число циклов ударного нагружения по стыкам рельсов $N_{уд}$, с учетом средней длины рельса 20 м, составит 6×10^5 , что соответствует малоцикловому нагружению.

В соответствии с этим, материал бандажа локомотивного колеса накапливает в основном малоцикловые ударно-контактные повреждения, которые в условиях низких температур усугубляются локализацией пластических деформаций, и обуславливает преждевременный выход из строя элементов железнодорожной техники.

Вследствие того, что бандаж локомотивного колеса в процессе эксплуатации подвергается динамическим нагрузкам, возникает необходимость экспериментального определения сопротивления материала действию на него ударного нагружения. Распространенным методом определения сопротивления материала действию ударных нагрузок являются испытания на ударный изгиб. Метод основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра. Концы образца располагают на опорах. В результате испытания определяют полную работу, затраченную при ударе (работу удара), или ударную вязкость. Под ударной вязкостью следует понимать работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора. Ударная вязкость характеризует надежность материала, его способность сопротивляться хрупкому разрушению.

Для определения значения ударной вязкости из материала бандажа локомотивного колеса были вырезаны образцы для испытаний на ударный изгиб (Рис. 1). Образцы испытывались согласно ГОСТ 9454-78 [3] на маятниковом копре Zwick Roell (производства Германии) Центра коллективного пользования ИФТПС СО РАН г. Якутск.

Основные размеры и геометрия образцов представлены на рис.1 и в табл. 1.

Поскольку бандаж локомотивного колеса эксплуатируется при различных температурах, то принципиальным является получение зависимости ударной вязкости материала бандажа как при положительных (20°C), так и при отрицательных температурах (-20 , -40 , и -60°C). Это также позволяет получить кривую ударной вязкости и определить температуру или диапазон температур вязко-хрупкого перехода. Охлаждение образцов производилось в охлаждающей камере LAUDA master.

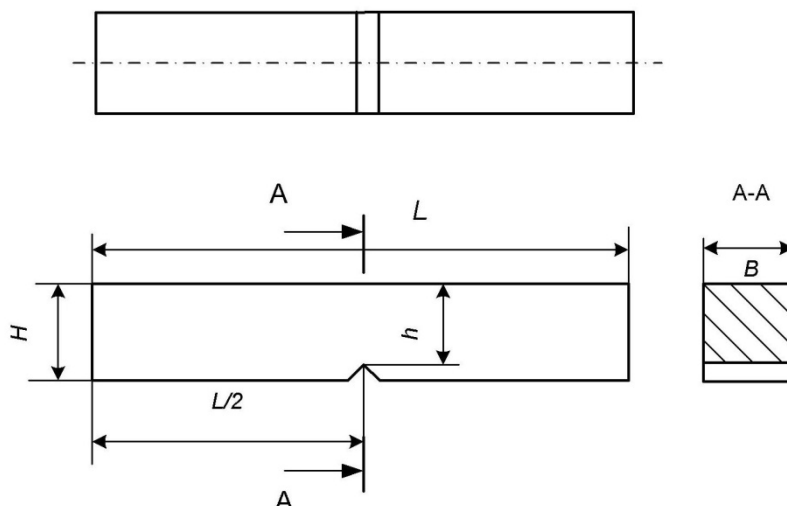


Рис. 1. Образец с V-образным надрезом для испытаний на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78.

Таблица 1. Основные размеры образцов, мм.

Вид концентратора	Длина L , (предельное отклонение 0,6)	Ширина, B (предельное отклонение 0,1)	Высота, H (предельное отклонение 0,1)	Высота рабочего сечения h (предельное отклонение 0,05)
V-образный надрез	55	10	10	8

Результаты испытаний представлены в таблице 2. Измеренная ударная вязкость 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, 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 (см. табл. 2, образцы 6-8). Таким образом, ударные воздействия, производимые на бандаж локомотивного колеса при температуре в окрестности - 40°C и ниже, будут приводить к сильной локализации пластических деформаций и образованию трещин по механизму откола. Процесс накопления повреждений будет усиливаться, и проводить к падению общего ресурса колесных пар.

Таблица 2. Результаты испытаний на ударную вязкость.

№ образца	T, °C	KCV, Дж/см2
1	-60	0,70
2		0,58
3		0,74
4		0,51
5		0,67
Среднее значение		0,62
6	-40	0,71
7		0,54
8		0,96
Среднее значение		0,73
9	-20	1,33
10		1,37
11		1,38
Среднее значение		1,36
1	20	2,29
2		1,75
3		1,69
7		1,72
8		1,64
Среднее значение		1,82

Задача определения поврежденности бандажа локомотивного колеса с полным учетом эксплуатационных условий достаточно сложна, но при определенных допущениях может быть решена в случае механических и температурных воздействий.

С физической точки зрения процесс поврежденности материала связан с возникновением и перемещением дефектов различного рода: вакансий, дислокаций, двойников, полос скольжения, микротрещин и микропор, зон упрочнения и разупрочнения, а также рядом других необратимых изменений структуры материала.

Основываясь на концепции накопления повреждений Качанова-Работнова [4,5], и предполагая автомодельность процессов накопления повреждений в материале бандажа локомотивного колеса от многоциклового статического (усталостного, fatigue) и малоциклового ударного (low-cycle, существенно зависящего от температуры эксплуатации) нагружения, величина общей накопленной поврежденности Ψ выразится суммой Ψ_F и Ψ_L (величин поврежденности от усталостного воздействия и малоциклового ударно-контактного). Тогда за N и K циклов соответствующих нагрузок величина накопленной поврежденности Ψ составит:

$$\Psi = \Psi_F + \Psi_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \psi_{Fi} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \psi_{Lk} \quad (2)$$

где ψ_{Fi} усталостная поврежденность на i -том цикле, ψ_{Lk} - малоцикловая ударно-контактная поврежденность на k -том цикле, обусловленная снижением ударной вязкости от температуры; N, K – соответствующие показатели числа циклов.

Первое и второе слагаемые учитывают доли повреждений вносимые соответственно многоцикловой усталостью и ударно-контактной нагрузкой, учитывающей снижение ударной вязкости и локализацию пластических деформаций.

Условие усталостного пластического деформирования в условиях жесткого нагружения может быть записано как:

$$\Psi_F = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta n}{N_i(T)} \quad (3)$$

где Δn - количество циклов в единичном акте повреждения; $N_i(T)$ - предельное число циклов (предел усталости) для данного материала.

Условие квазистатического пластического деформирования в условиях жесткого нагружения может быть записано как (деформационный критерий):

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \int_0^{\varepsilon_{pj}} \frac{de_j}{\varepsilon_p(T)}, \quad (4)$$

где ε_{pj} - показатель пластической деформации за j -ый цикл деформирования, при этом

$\sum_{j=1}^K \varepsilon_{pj} = \varepsilon_{pc}$, где ε_{pc} - предельное значение, характеризующее образование трещины.

В случае динамической деформации и сложного объемного напряженного состояния, возникающего на ободе колеса при соударении на стыке рельсов, интеграл в выражении (4) будет более корректно заменить J-интегралом по всему контуру действующих в окрестности возникающей трещины деформаций:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \frac{\Delta J_j}{J_C(T)}, \quad (5)$$

где $J_C(T)$ – предельное значение критерия, которое соответствует возникновению разрушения, и не зависит от конфигурации образца. При этом существенной будет зависимость возникающих деформаций и способности материала к высвобождению энергии от температуры испытаний или эксплуатации.

3. Результаты и их обсуждение.

В результате проведенных испытаний установлено, что наряду с многоцикловым нагружением, на процесс накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса значительно влияет ударно-контактное воздействие по стыкам рельс. Количество циклов до выхода из строя по причине образования недопустимых повреждений в бандаже локомотивного колеса составляет $N = 2,4 \cdot 10^6$ и 6×10^5 циклов соответственно для усталостного и ударно-контактного нагружения.

Учитывая вышеописанные факторы, условие разрушения в общем виде будет выглядеть следующим образом:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta n}{N_i(T)} + \sum_{j=1}^K \frac{\Delta J_j}{J_C(T)} = 1, \quad (5)$$

На рис.2 представлена зависимость ударной вязкости после сплайновой аппроксимации.

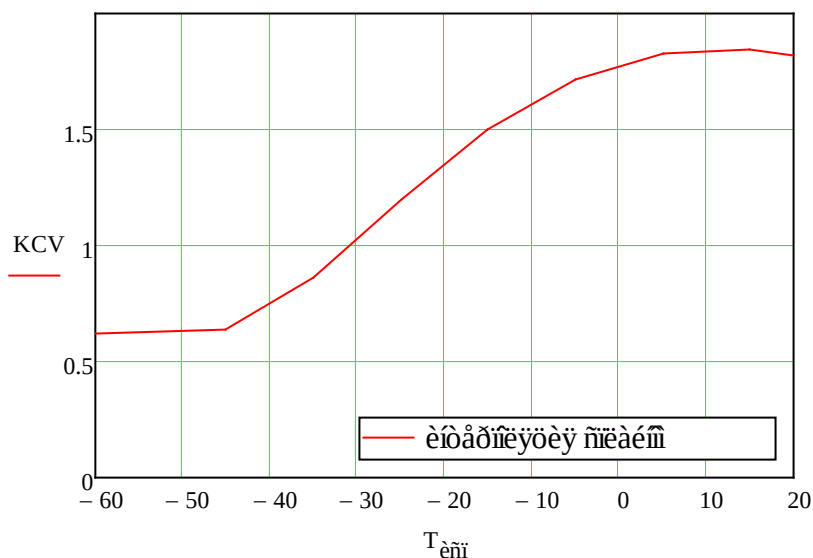


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости от температуры, полученная сплайновой интерполяцией.

Ударная вязкость при температуре испытаний -60°C падает в три раза, следовательно, хотя и сталь обладает высокими механическими характеристиками, при понижении температуры уже ниже -30°C (а минимально рекомендованная температура для этой стали -40°C) материал претерпевает вязко-хрупкий переход, и энергия, необходимая для его разрушения, существенно падает. Вследствие этого, снижается сопротивление материала действию ударных нагрузок, хотя прочность и удлинение по данным статических испытаний сохраняются на достаточно высоком уровне, и происходит ускоренное накопление структурных повреждений, обусловленное локализацией деформаций и образованием микротрещин.

Для того, чтобы оценить накапливаемые повреждения, использовались данные по температуре окружающей среды на эксплуатируемом участке железной дороги.

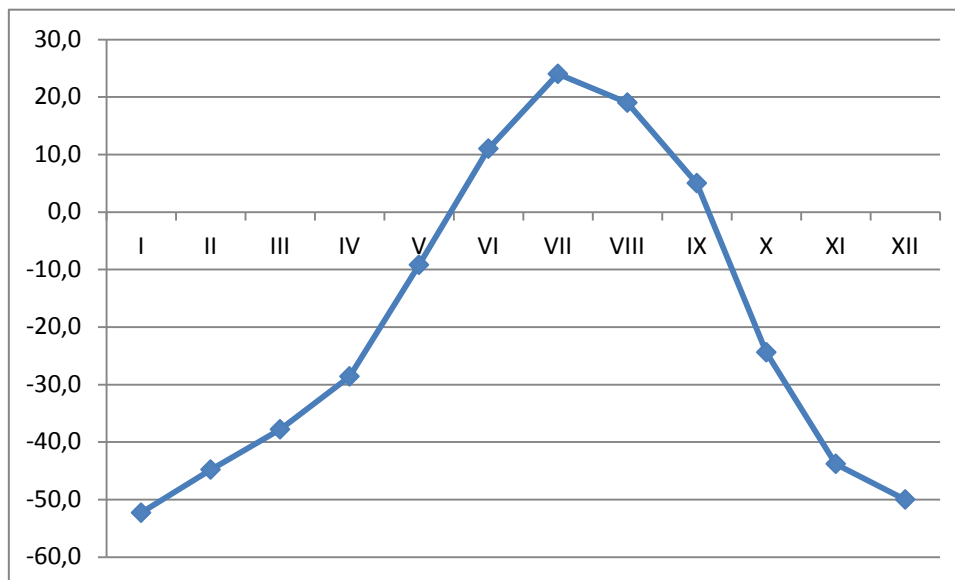


Рис. 3. Средние значения температуры окружающей среды по шкале Цельсия в г. Томмот РС(Я), предоставленные метеослужбой Республики Саха(Якутия). По оси х-месяц года; у-значение температуры.

Как видно из рис. 3 перепады температуры окружающей среды в среднем составляют более 70°C , и если сопоставить значения ударной вязкости, полученные в результате вышеописанных испытаний на ударный изгиб с данными по температуре, то можно увидеть, что в зимнее время материал бандажа локомотивного колеса подвергается большой опасности, работая в неблагоприятной области с пониженной стойкостью к ударным нагрузкам, а также испытывая большие температурные напряжения. Но даже такое сопоставление не позволяет полностью оценить накопленную при эксплуатации поврежденность, т.к. элементы железнодорожной техники эксплуатируются и при минимальной температуре окружающей среды.

Поэтому использовались и данные о минимальных температурах на участке Алдан-Томмот (рис.4). Значения минимальной температуры окружающей среды на эксплуатируемом участке в основном лежат ниже нуля, и большей частью ниже -20°C , таким образом, элементы колеса эксплуатируются при пониженных значениях ударной вязкости. На рис.5 представлены вычисленные согласно сплайновой аппроксимации значения ударной вязкости материала бандажа локомотивного колеса, соответствующие минимальным температурам на рис.4.

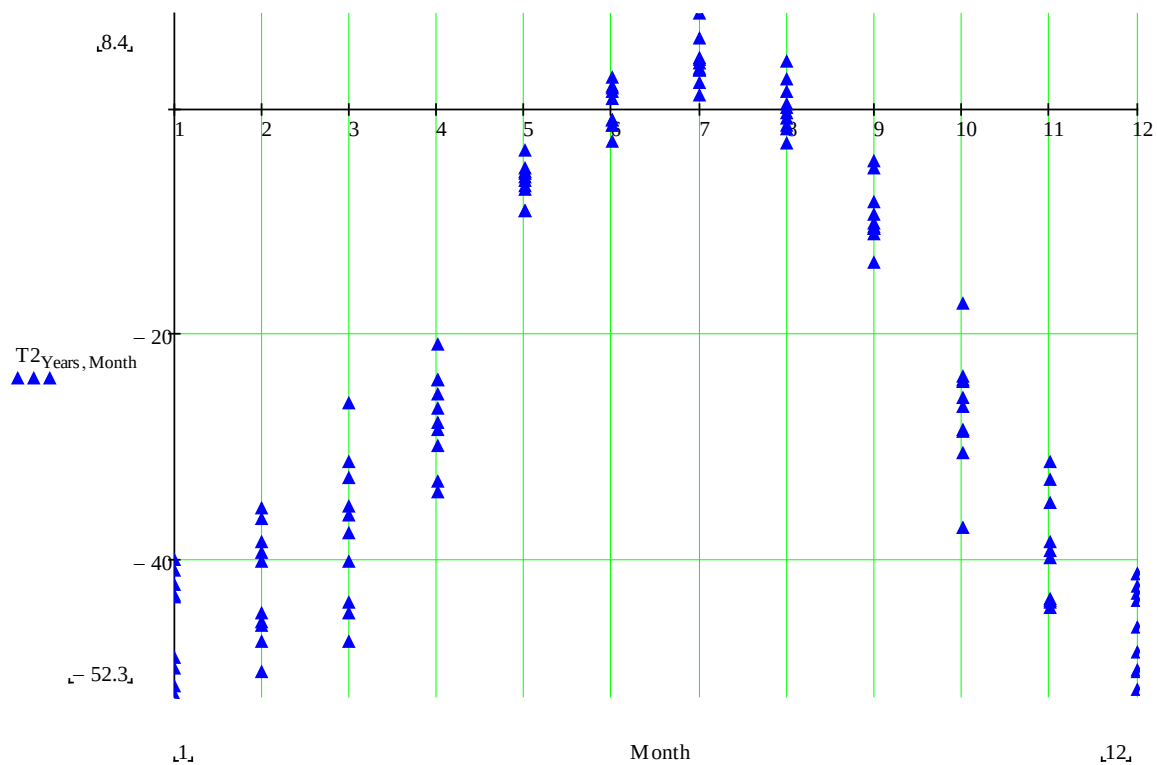


Рис. 4. Минимальные температуры окружающей среды на участке Алдан-Томмот за 2008-2012 гг., предоставленные метеослужбой Республики Саха(Якутия). По оси ординат - месяц года; по оси абсцисс - значение температуры.

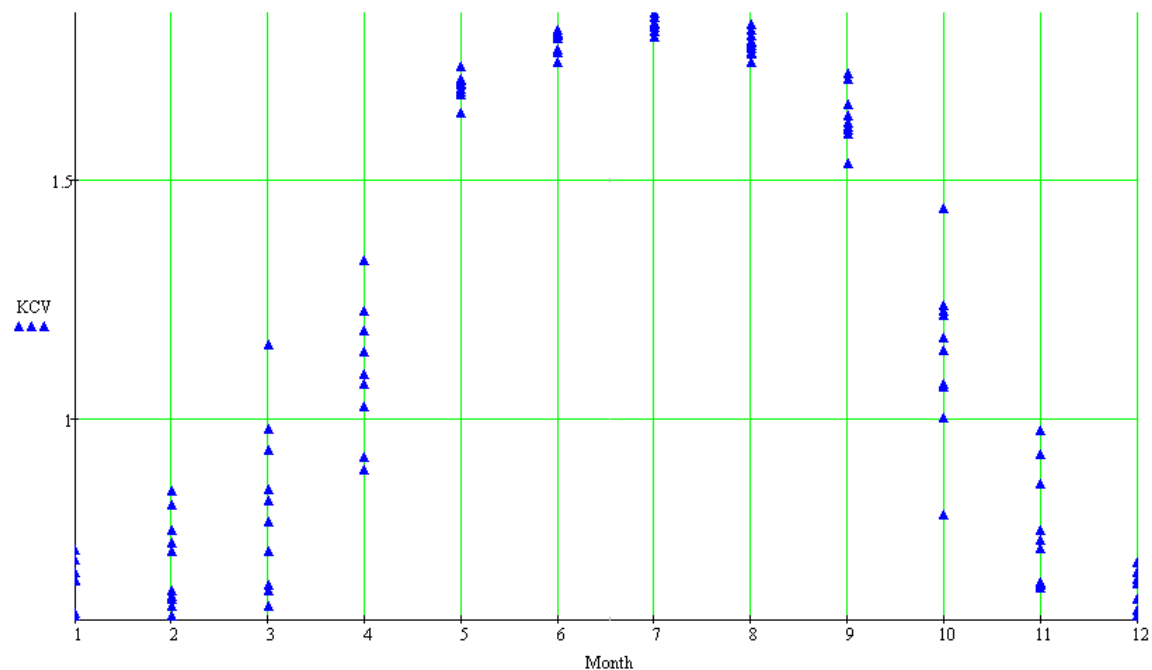


Рис.5. Вычисленные значения ударной вязкости, соответствующие минимальной температуре на участке Алдан-Томмот с 2008 по 2012 гг.

Уменьшение значения KCV при низких температурах испытаний говорит об ухудшении способности материала высвобождать энергию пластических деформаций, и коррелирует с J_c , обретающей физический смысл, таким образом, как вязкость разрушения. При равных значениях температуры такая связь была получена также экспериментально в работе [6] для высокопрочных сталей.

Поэтому для оценки величины интегрального соотношения в (4) можно применить разработанный эволюционный подход, основанный на логистической зависимости накопления повреждений на различных структурных уровнях деформации [7,8], а также учесть корреляцию между ударной вязкостью KCV и вязкостью разрушения J_{IC} при равных значениях температуры испытаний [6].

Исходя из известного соотношения для J-интеграла, предполагая равные скорости динамического воздействия на колесо от рельса на различных участках полотна, можно принять

$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{2G}$, где $G = \frac{E}{2(1-\mu^2)}$, E – модуль упругости Юнга, μ – коэффициент Пуассона [9]. Откуда с учетом $K_I \propto \frac{1}{\sqrt{\sigma}}$ и ассоциированного закона течения:

$$\psi_T = \sum_{j=1}^K \left[\left(1 - \frac{KCV_j}{KCV_0} \right)^m \right], \quad (5)$$

где KCV_0 , KCV_j – ударная вязкость при комнатной температуре, и в момент j -го повреждения, соответственно, $m \sim 0,25-0,3$ – коэффициент, зависящий от материала и вида НДС.

В результате проведенных испытаний установлено, что наряду с многоцикловым контактно-усталостным нагружением, на процесс накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса воздействует и ударная нагрузка от рельсовых стыков. Количество циклов до выхода из строя по причине образования недопустимых повреждений в бандаже локомотивного колеса от усталостного и ударного нагружения составляет $N = 2,4 \cdot 10^6$ и 6×10^5 циклов соответственно.

Учитывая вышеописанные факторы, условие разрушения в общем виде будет выглядеть следующим образом:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta n}{N_i(T)} + \sum_{j=1}^K \left[\left(1 - \frac{KCV_j}{KCV_0} \right)^m \right] = 1, \quad (6)$$

На основании проведенных исследований предложен критерий разрушения, учитывающий как усталостный характер разрушения, так и ударное воздействие при прохождении рельсовых стыков, чувствительное к снижению температуры эксплуатации.

В общем виде процесс накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса можно представить следующим образом (Рис. 5): 1) В результате контакта с рельсом и воздействия ударных нагрузок от рельсовых стыков происходит деформация микроструктуры поверхностного слоя на глубине 3-4 мм (наклеп). В материале с деформированной структурой, при воздействии низких климатических температур повышается твердость, ухудшаются механические характеристики: повышается предел текучести материала, снижается относительное удлинение образца, материал становится более хрупким. В подповерхностном слое, на глубине наклепанного слоя происходит образование и рост микродефектов (микропор и микротрещин). 2) При дальнейшем воздействии нагрузок в виде ударного нагружения от рельсовых стыков происходит развитие поврежденности (трещины) путем слияния образовавшихся микродефектов по границе деформированной структуры. При низких климатических температурах данный процесс происходит быстрее, так как материал находится в хрупком состоянии. Слой материала с деформированной структурой теряет свои пластические свойства и тем самым снижается сопротивление материала к большим воздействиям ударной нагрузки.

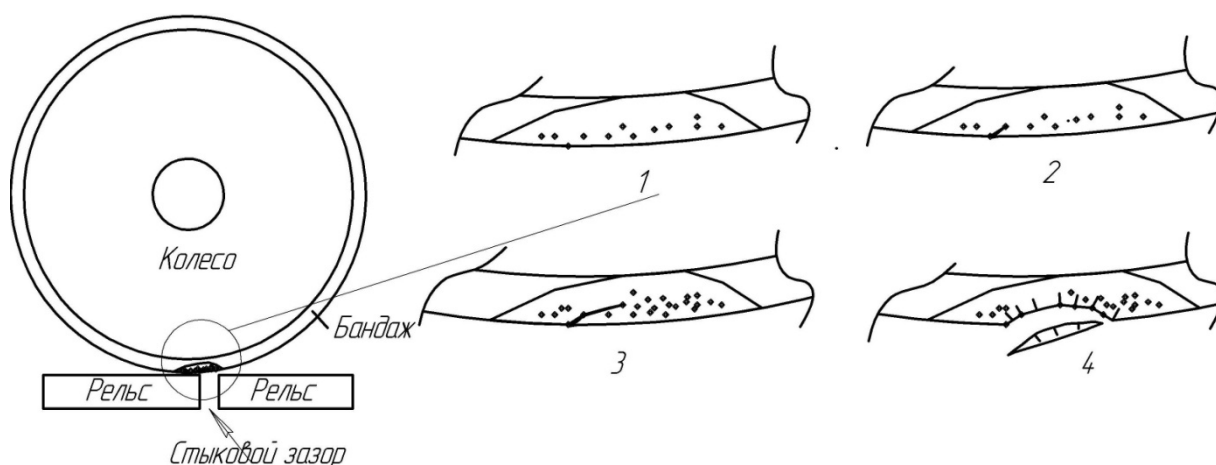


Рис. 6. Стадия зарождения и распространения трещины с дальнейшим выкрашиванием на поверхности бандажа локомотивного колеса: 1-образование микродефектов без взаимодействия друг с другом. 2, 3-зарождение и рост трещины путем слияния микродефектов. 4-выкрашивание (разделение на части) на поверхности катания бандажа локомотивного колеса.

Ударная нагрузка от рельсовых стыков, значительно ухудшает условия работы, что приводит к возникновению ряда опасных повреждений помимо усталости металла и может явиться

причиной полного отказа колеса в эксплуатации, что может привести к крушению подвижного состава. Учитывая среднюю длину одного рельса в пути равную 20 м, было рассчитано количество циклов до разрушения от ударного нагружения равное 6×10^5 , что соответствует малоцикловому повреждению.

В целом можно сказать, что проблема более высокой интенсивности образования поверхностных повреждений непосредственно связана с эксплуатацией бандажа локомотивного колеса в условиях аномально низких климатических температур. Материал данного элемента при понижении температуры окружающей среды быстрее теряет свои пластические свойства, тем самым ускоряется процесс накопления повреждений.

Список литературы

1. Григорьев А.В., Лепов В.В. Контактно-усталостные повреждения колес локомотива, эксплуатируемого в условиях Севера // Материалы V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург: ИМАШ УРО РАН, 2011. Электрон. опт. диск. Вкладка «Публикации».
2. 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.
3. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 2003.
4. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.
5. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. М.: Наука, 1987. 80 с.
6. Чернов В.М., Ермолаев Г.Н., Леонтьева-Смирнова М.В. Вязкость разрушения хромистой (12%) ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при нагружении на сосредоточенный изгиб // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 7. С.72-77.
7. Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4, № 5. С. 81-87.
8. Lepov V.V. Structural evolution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials // World Journal of Engineering. 2012. Vol. 10, no. 5.
9. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Ч. 2 / отв. ред. В.Т. Трощенко; АН Украины; Институт проблем прочности. Киев: Наукова думка, 1994. 701 с.

Damages and resource of locomotive wheels used under the north operating conditions

02, February 2014

DOI: **10.7463/0214.0699140****A.V. Grigorev, V.V. Lepov**

Institute for Physical and Technical Problems of the North n.a. V.P. Larionov, Yakutsk
griegor1212@mail.ru
lepov@iptpn.ysn.ru

In operating railway equipment, in particular the elements, such as a wheel and a rail there is damage accumulation of any kind, causing a premature equipment failure. Thus, an analysis of the mechanisms and modeling of damage accumulation and fracture both on the surface and in the bulk material remain a challenge.

Data on the defective wheel sets to be subjected to facing has been collected and analyzed to assess the locomotive wheel sets damage of the locomotive fleet company of AK «Yakutia Railways», city of Aldan, The Republic of Sakha (Yakutia). For this purpose, three main locomotives have been examined.

The object of research carried out in this paper, is a locomotive wheels tire, which is subjected to cyclic impact (dynamic) loads during operation. In this regard, the need arises to determine both the strength of material in response to such shock loads and the quantitative calculation of damage accumulated therein.

The accumulated fatigue damage has been attributed to one radial cross section of the wheel coming into contact with the rail once per revolution of the wheel. Consequently, in one revolution a wheel is under one loading cycle. As stated, the average mileage of locomotives to have the unacceptable damages formed on the tread surface is 12 thousand km.

Test results establish that along with the high-cycle loading the shock-contact action on rail joints significantly affects the accumulation of damage in the locomotive wheels tire. The number of cycles to failure due to the formation of unacceptable damage in the locomotive wheels tire is $N = 2,4 \times 10^6$ and 6×10^5 cycles, respectively, for fatigue and shock-contact loading.

In general, we can say that the problem of higher intensity to form the surface damage is directly related to the operation of the locomotive wheel tire under abnormally low climatic temperatures. With decreasing ambient temperature, this element material rapidly loses its plastic properties, thereby accelerating the process of damage accumulation.

Publications with keywords: [contact fatigue](#), [accumulation of damages](#), [damage](#), [shock loading](#)
Publications with words: [contact fatigue](#), [accumulation of damages](#), [damage](#), [shock loading](#)

References

1. Grigor'ev A.V., Lepov V.V. [Contact-fatigue damage of wheels of locomotive operated in conditions of North]. *Materialy 5 Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Resurs i diagnostika materialov i konstruktsiy"* [Proc. of the 5th Russian Scientific and Technical Conference "Resource and diagnosis of materials and structures"]. Ekaterinburg, Publ. of Institute of Engineering Science, RAS (Ural Branch), 2011. CD-disk. "Publications". (in Russian)
2. Grigor'ev A.V., Lepov V.V. [Mechanisms of damage accumulation and material destruction of rail wheel rim operating in the North]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 79-85. (in Russian)
3. GOST 9454-78. *Metally. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennykh, komnatnoy i povyshennykh temperaturakh* [State Standard 9454-78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature]. Moscow, Standards Publishing House, 2003. (in Russian)
4. Kachanov L.M. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Basics of fracture mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 312 p. (in Russian)
5. Rabotnov Yu.N. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya* [Introduction to fracture mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 80 p. (in Russian)
6. Chernov V.M., Ermolaev G.N., Leont'eva-Smirnova M.V. [Impact toughness of EK-181 ferritic-martensitic chromium (12%) steel under loading by concentrated bending]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2010, vol. 80, no. 7, pp.72-77. (English translation: *Technical Physics*, 2010, vol. 55, no. 7, pp. 985-990. DOI: [10.1134/S106378421007011X](https://doi.org/10.1134/S106378421007011X)).
7. Arkhangel'skaya E.A., Lepov V.V., Larionov V.P. [The connected model for delayed fracture of damaged media]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2001, vol. 4, no. 5, pp. 81-87. (English translation: *Physical Mesomechanics*, 2001, vol. 4, no. 5, pp. 75-80.).
8. Lepov V.V. Structural evolution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials. *World Journal of Engineering*, 2012, vol. 10, no. 5.
9. Troshchenko V.T., Krasovskiy A.Ya., Pokrovskiy V.V., Sosnovskiy L.A., Strizhalo V.A. *Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu. Spravochnoe posobie. Ch. 2* [Material's strength to deformation and failure. Handbook. Part 2]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1994. 701 p. (in Russian)