

## Оценка ресурса элементов железнодорожной техники, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур

А.В. Григорьев, В.В. Лепов, В.Н. Тагров

*Экстремальные условия эксплуатации в условиях Крайнего Севера характеризуются резкими перепадами температур, которые могут достигать 100 и более градусов на поверхности материалов, в зависимости от их отражающей способности, с многократным переходом через точку замерзания воды. Такие негативные климатические факторы в значительной степени обуславливают снижение эффективности эксплуатации технических сооружений и оборудования в условиях Крайнего Севера, включая железнодорожный транспорт. Исследован процесс накопления поврежденности в материале, описана методика оценки поврежденности и ресурса бандажа локомотивного колеса, эксплуатируемого в условиях низких климатических температур. Приведена расчетно-экспериментальная методика оценки накопления повреждений и расчетного ресурса бандажа локомотивного колеса. Предложен критерий разрушения, учитывающий как усталостный характер разрушения, так и ударное воздействие при прохождении рельсовых стыков, чувствительное к снижению температуры эксплуатации.*

Ключевые слова: контактная усталость, накопление повреждений, поврежденность, ударное нагружение.

*Extreme service conditions in the Far North are characterized by sharp drops of temperatures which may reach 100 and more degrees on materials surface, depending on their reflecting ability, with repeated transition through a water freezing point. Such negative climatic factors substantially cause decrease in efficiency of operation of technical constructions and equipment in the conditions of Far North, including railway transport. In the article a process of accumulation of damage in a material is investigated, the technique of assessment of damage and a resource of a bandage of the locomotive wheel operated in the conditions of low climatic temperatures is described. The rated and experimental technique of assessment of accumulation of damages and rated resource of a bandage of a locomotive wheel is given. The criterion of destruction considering both fatigue nature of destruction, and shock influence during passing rail joints, sensitive to decrease in temperature of operation is offered.*

Key words: contact fatigue, accumulation of damages, damage, shock loading.

### Введение

Основным направлением научных исследований в области железнодорожного транспорта в рамках стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденной правительством 17 июня 2008 г., является разработка нормативно-методологической базы для расчетов параметров эксплуатационной готовности, прочности, безопасности и ресурса подвижного состава, а также инфраструктуры железнодорожного транспорта.

В процессе эксплуатации железнодорожной техники, в частности, таких элементов, как колесо и рельс, происходит накопление повреждений различного характера, обуславливающих прежде-

временный 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 являются 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.

В результате исследований [1] установлено преобладание контактно-усталостных повреждений на поверхностной части бандажа локомотивного колеса. Такие дефекты могут развиваться от поверхности вглубь металла, тем самым обуславливая выход детали из строя, и при неблагоприятных обстоятельствах ведут к аварии или крушению поезда. Из-за высокой интенсивности

---

ГРИГОРЬЕВ Альберт Викторович – вед. инженер ИФТПС СО РАН, gregor1212@mail.ru; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., зам. дир. ИФТПС СО РАН, leпов@iptn.usn.ru; ТАГРОВ Василий Николаевич – вед. инженер ИФТПС СО РАН.

образования такого рода повреждений снижается средний ресурс деталей и повышаются экономические расходы на их ремонт и приобретение. В результате проведенных механических испытаний [2] выявлено, что 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.

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.

### Материалы и методика эксперимента

В данной статье 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 цикла на 1 км рельсового пути.

Тогда 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  $6 \times 10^5$ , 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.

Были определены значения ударной вязкости на образцах для испытаний на ударный изгиб, изготовленных из материала бандажа локомотивного колеса по ГОСТ 9454–78 [3] (рис. 1). Образцы испытывались на маятниковом копре Zwick Roell (производства Германии) Центра коллективного пользования ИФТПС СО РАН г. Якутск. Геометрические размеры 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 ( $20^{\circ}\text{C}$ ), так и при отрицательных температурах ( $-20$ ,  $-40$ , и  $-60^{\circ}\text{C}$ ). Это также позволяет получить кривую ударной вязкости и определить температуру или диапазон температур вязкохрупкого перехода.

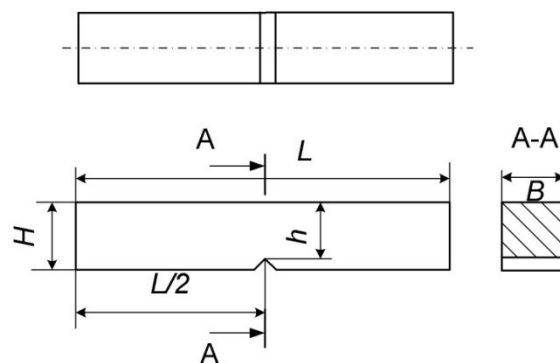


Рис. 1. Образец с V-образным надрезом для испытаний на ударный изгиб по ГОСТ 9454–78

Т а б л и ц а 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

Таблица 2

## Результаты испытаний на ударную вязкость

	T, °C	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
Среднее значение	-60	0,62
	-40	0,73
	-20	1,36
	20	1,82

Результаты испытаний представлены в табл. 2. Измеренная ударная вязкость материала бандажа при температуре испытаний  $-60^{\circ}\text{C}$  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  $-40^{\circ}\text{C}$  наблюдается наибольший разброс величин ударной вязкости, что, собственно, и характеризует момент перехода в хрупкое состояние (табл. 2, образцы 6–8). Таким образом, ударные воздействия, производимые на бандаж локомотивного колеса при температуре в окрестности  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже, будут приводить к сильной локализации пластических деформаций и образованию трещин по механизму откола. Процесс накопления повреждений будет усиливаться и приводить к падению общего ресурса колесных пар.

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

С использованием концепции накопления повреждений Работнова – Качанова [4,5], а также 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  $\Psi$  выразится суммой  $\Psi_F$  и  $\Psi_L$  (величин поврежденности от усталостного воздействия и малоциклового ударно-контактного). Тогда за  $N$  и  $K$  циклов соответствующих нагрузок величина накопленной поврежденности  $\Psi$  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  $\Psi_{Fi}$  – усталостная поврежденность на  $i$ -м цикле;  $\Psi_{Lk}$  – малоцикловая ударно-контактная поврежденность на  $k$ -м цикле, обусловленная снижением ударной вязкости от температуры;  $N$ ,  $K$  – соответствующие показатели числа циклов.

Первое и второе слагаемые учитывают доли повреждений, вносимые соответственно много-

цикловой 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:

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

где  $\Delta n_i$  – 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  $\varepsilon_{pj}$  – показатель пластической деформации за  $j$ -й цикл деформирования, при этом  $\sum_{j=1}^K \varepsilon_{pj} = \varepsilon_{pc}$ ,

где  $\varepsilon_{pc}$  – предельное значение, характеризующее образование трещины.

В случае динамической деформации и сложного объемного напряженного состояния, возникающего на ободке 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.

### 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  $N = 3,64 \cdot 10^6$  и  $6 \cdot 10^5$  циклов соответственно для усталостного и ударно-контактного видов нагружения.

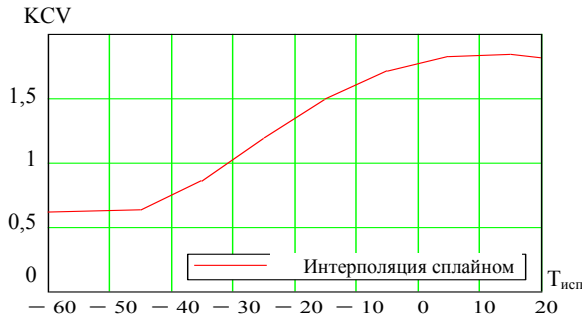


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости от температуры, полученная сплайновой интерполяцией. По оси  $x$  – температура испытаний; по оси  $y$  – значение ударной вязкости KCV

С учетом вышеописанных факторов условие разрушения в общем виде будет выглядеть следующим образом:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta n_i}{N_i(T)} + \sum_{j=1}^K \frac{\Delta J_j}{J_C(T)} = 1. \quad (6)$$

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

Ударная вязкость при температуре испытаний  $-60^{\circ}\text{C}$  падает в три раза, следовательно, хотя и сталь обладает высокими механическими характеристиками, при понижении температуры уже ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  (а минимально рекомендованная температура для этой стали  $-40^{\circ}\text{C}$ ) материал претерпевает вязкохрупкий 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.

Согласно рис. 3, перепады температуры окружающей среды в среднем составляют более  $70^{\circ}\text{C}$ , и если сопоставить значения ударной вязкости, полученные в результате вышеописанных испытаний на ударный изгиб с данными по тем-

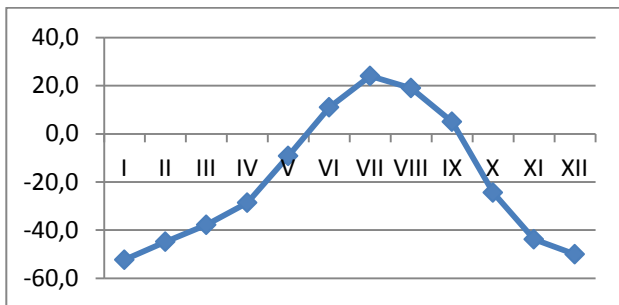


Рис. 3. Средние значения температуры окружающей среды по шкале Цельсия в г. Томмот, предоставленные метеослужбой РС(Я). По оси  $x$  – месяц года; по оси  $y$  – значение температуры

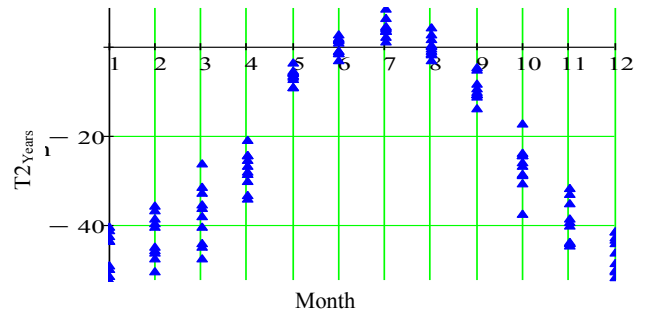


Рис. 4. Минимальные температуры окружающей среды на участке Алдан–Томмот за 2008–2012 гг., предоставленные метеослужбой РС (Я). По оси ординат – месяц года; по оси абсцисс – минимальные температуры

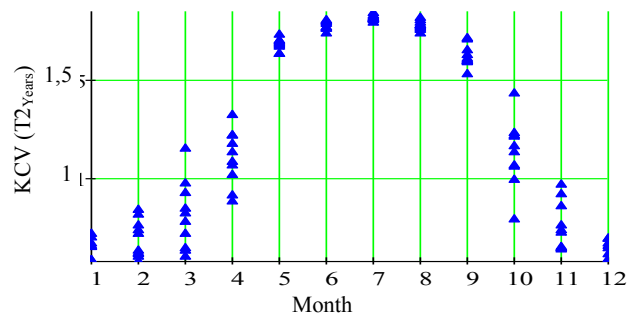


Рис. 5. Вычисленные значения ударной вязкости, соответствующие минимальной температуре на участке Алдан–Томмот за 2008–2012 гг. По оси ординат – месяц года; по оси абсцисс – значение ударной вязкости KCV

пературе, 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 (рис. 4).

На рис.5 представлены вычисленные, согласно сплайновой аппроксимации, значения ударной вязкости материала бандажа локомотивного колеса, соответствующие минимальным температурам на рис.4.

Уменьшение значения KCV при низких температурах испытаний говорит об ухудшении способности материала высвободить 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,  $\mu$  – коэффициент Пуассона [9]. Откуда с учетом  $K_{IC} = \frac{1}{\sqrt{\sigma}}$  и ассоциированного закона течения:

$$\psi_T = \sum_{j=1}^K \left[ \left( 1 - \frac{KCV_j}{KCV_0} \right)^m \right], \quad (7)$$

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.

### Выводы и заключение

Ударная нагрузка от рельсовых стыков 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  $6 \times 10^5$ , что соответствует малоцикловому повреждению.

В зимнее время материал бандажа локомотивного колеса подвергается большим напряжениям, что можно определить при сопоставлении значений ударной вязкости, полученных в результате вышеописанных испытаний на ударный изгиб с данными по температуре.

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.

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

### Литература

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: (электронный ресурс). – Екатеринбург: ИМАШ УРО РАН, 2011 / Электрон. оптич. 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.
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 // ЖТФ. – 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, №4. – С.81–87.
8. Lepov V.V. Structural eVution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials // World Journal of Engineering. – 2012. – 10 (5).
9. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Часть 2. АН Украины. Институт проблем прочности / Отв. редактор В.Трошенко. – Киев: Наукова думка, 1994. – 701 с.

Поступила в редакцию 16.01.2014