

чение производительных сил Якутии совместными усилиями Академии наук страны и Якутской республики. А результаты ее работы определили дальнейшую судьбу огромного региона, программу его освоения, показали пример государственного подхода к развитию богатейших северных территорий. Эти экспедиционные исследования положили начало процессу формирования сети научных учреждений Якутии.

Но если в ходе работы первой комплексной экспедиции была решена такая стратегическая задача, как изучение природных ресурсов с перспективой их дальнейшей эксплуатации, то организуемая вторая Якутская комплексная научно-исследовательская экспедиция должна включить задачу сохранения экологического баланса в условиях глобальных природных

процессов и техногенного воздействия человека на Север и Арктику.

В область интересов современной экспедиции входят поиск и разработка наиболее эффективных, щадящих технологий добычи минерального, органического и биологического сырья, методов ресурсо- и энергосбережения, создания эффективной энергетики в условиях Крайнего Севера с привлечением нетрадиционных и автономных источников энергии.

Ниже представлена серия статей, показывающих несколько направлений перспективных исследований Института, развитие которых совместно с коллегами из центральных институтов РАН могло бы внести существенный вклад в решение задач, стоящих перед наукой на Севере.

© Заместитель директора ИФТПС СО РАН,
действительный член Академии наук Республики Саха (Якутия),
докт. техн. наук В. В. Лепов

УДК 620.163.4:621.135.2

ОЦЕНКА РЕСУРСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

© А. В. Григорьев, В. В. Лепов¹

Статья поступила 15 октября 2014 г.

В ходе эксплуатации локомотивного колеса сталь, из которой оно изготовлено, подвергается воздействию статических, динамических и усталостных нагрузок. В экстремальных условиях Севера ресурс работы таких колес сокращается в несколько раз. В связи с этим проведены испытания колесной стали на ударную вязкость и дана оценка накопления в ней повреждений с учетом контактной усталости в условиях низких климатических температур Центральной Якутии. На основе оценки накопления повреждений предложена методика расчёта ресурса бандажа локомотивного колеса.

Ключевые слова: разрушение; поврежденность; бандаж локомотивного колеса; ударная вязкость; ресурс.

В процессе эксплуатации железнодорожной техники, в частности таких сильно нагруженных элементов, как колесо и рельс, происходит накопление повреждений различного характера. В конечном счете это приводит к преждевременному выходу техники из строя. Большое значение при этом имеет не только выявление механизмов, но и моделирование процессов накопления повреждений и разрушения, имеющих свои особенности в экстремальных условиях эксплуатации.

Для оценки повреждений техники локомотивного парка предприятия ОАО АК «Железные дороги Якутии» [г. Алдан, Республика Саха (Якутия)] собраны

данные по дефектным колесным парам, подлежащим обточке. Исследованы тепловозы различных марок: 2ТЭ10М-2235, 3ТЭ10МК-2795, GE-0884, ТЭМ2-5010.

В результате проведенных исследований установлено преобладание контактно-усталостных дефектов, таких как выщербины, выкрашивания, раковины на поверхностной части бандажа локомотивного колеса [1]. В процессе эксплуатации дефекты развиваются от поверхности катания в глубь металла, что при неблагоприятных обстоятельствах ведет к аварии или разрушению поезда [2]. Образование таких дефектов приводит к снижению среднего ресурса деталей, а также к затратам на приобретение новых. Как показали механические испытания [3], пластичность материала бандажа локомотивного колеса при низких температу-

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: leпов@iptpn.ysn.ru

рах существенно падает, хотя предел текучести остается на том же уровне или незначительно повышается. От контакта с рельсом на поверхности катания образуется характерный наклеп глубиной 3–4 мм, который отличается повышенными значениями прочностных свойств и становится в дальнейшем концентратором дополнительных напряжений.

Расчет ресурса машин и конструкций в большинстве случаев требует решения задачи накопления повреждений. Прогнозирование достижения предельного состояния и расчет остаточного ресурса тесно связаны с необходимостью создания соответствующей теоретической численной модели.

Цель данной работы — оценка ресурса бандажа локомотивного колеса, который в процессе эксплуатации подвергается усталостным и контактно-усталостным динамическим нагрузкам. В этой связи возникает необходимость определения сопротивления материала действию таких нагрузок и количественного расчета накапливаемых в нем повреждений. Материал бандажа колеса — колесная сталь марки 2, углеродистая низколегированная с ферритно-перлитной структурой. Основные механические свойства стали 2 определены согласно ГОСТ 1497–84 и представлены в табл. 1.

В процессе эксплуатации на поверхности катания образуется очаг выкрашивания, или откол, при этом количество циклов до его появления и будет определять ресурс до технологического восстановления бандажа локомотивного колеса (очередной обточке).

Цикл нагружения в процессе накопления усталостных повреждений упрощенно можно представить как единичный контакт радиального сечения колеса с рельсом за один оборот. Средний пробег локомотива до образования недопустимых повреждений на поверхности катания L_{cp} согласно наблюдениям составляет всего 12 тыс. километров [1], что примерно в 30 раз меньше, чем расчетный заводской ресурс. При среднем диаметре колеса локомотива $D = 1050$ мм на один километр рельсового пути количество циклов $N_1 = 303$. Тогда средняя величина предельного числа циклов

$$N = N_1 L_{cp} = 12\,000 \cdot 303 = 3,636 \cdot 10^6, \quad (1)$$

что далеко от предела усталости для этой стали. Следует также учесть, что в условиях низких температур предел усталости повышается.

С другой стороны, число циклов ударно-контактного нагружения колеса по стыкам рельс $N_{уд}$ с учетом средней длины рельса 20 м составит всего $6 \cdot 10^5$, что соответствует малоцикловой усталости. В условиях низких температур контактная усталость усугубляется локализацией пластических деформаций вследствие потери пластичности материала, что, очевидно, 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. Метод испытаний на ударный изгиб основан на разрушении образца с концентратором ударом маятникового копра. В результате испытания определяется полная работа, затраченная при ударе, или ударная вязкость. Таким образом, под ударной вязкостью понимается работа удара, отнесенная к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора, что характеризует способность материала сопротивляться хрупкому разрушению.

Ударную вязкость определяли на образцах, вырезанных из материала бандажа локомотивного колеса. Образцы испытывали на ударный изгиб согласно ГОСТ 9454–78 [4] на маятниковом копке Zwick Roell. Основные размеры и геометрия образцов представлены в табл. 2.

Поскольку бандаж локомотивного колеса эксплуатируется при различных температурах, то необходимо определить значения ударной вязкости материала бандажа как при положительных (20 °C), так и при отрицательных (–20, –40, и –60 °C). Это позволяет получить кривую ударной вязкости и определить температуру или диапазон температур вязкохрупкого перехода. Образцы охлаждали в предназначенной для этого камере LAUDA master.

Результаты испытаний представлены в табл. 3. Ударная вязкость материала бандажа при температуре испытаний –60 °C в три раза ниже, чем при 20 °C. Таким образом, несмотря на высокие показатели прочности материал при низкой температуре становится хрупким, снижается его сопротивление действию ударных нагрузок. С другой стороны, уже при температуре –40 °C наблюдается наибольший разброс величин ударной вязкости, что и характеризует момент перехода в хрупкое состояние (см. табл. 3, образцы 6–8). В результате ударные воздействия, произ-

Таблица 1. Механические характеристики образцов из материала локомотивного бандажа при –50 °C и комнатной температурах

Температура испытаний, °C	Номер образца	Размеры образцов		σ_T	σ_B	δ
		S_0	L_0			
20	10	12,57	26,0	708,97	1067,77	10,61
	11	12,57	26,0	686,12	1012,94	10,14
	12	12,57	26,0	705,40	1030,90	10,09
Среднее значение				690,16	1037,2	10,28
–50	7	12,57	26,0	747,61	1035,3	8,64
	8	12,57	26,0	769,85	1135,21	8,93
	9	12,57	26,0	749,77	1029,49	8,33
Среднее значение				755,74	1066,67	8,63

Таблица 2. 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 3. Результаты испытаний на ударную вязкость

Номер образца	$T, ^\circ\text{C}$	$KCV, \text{Дж/см}^2$
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

водимые на бандаж локомотивного колеса при температуре -40°C и ниже, приводят к сильной локализации пластических деформаций и образованию трещин по механизму откола. Процесс накопления повреждений усиливается, а следовательно, общий ресурс колесных пар падает.

Модель накопления повреждений. Анализ очагов разрушения на поверхности бандажей локомотивных колес, выведенных из эксплуатации, а также результатов механических испытаний показал, что на процесс накопления повреждений в материале значительное влияние оказывает ударно-контактное малоцикловое нагружение по стыкам рельсов (контактная усталость). В условиях низких температур эксплуатации оно превалирует над обычной усталостью и становится основной причиной повреждения локомотивных колес.

Основываясь на концепции накопления повреждений Качанова – Работнова [5, 6], запишем кинетическое уравнение

$$\frac{d\psi}{dt} = f(\psi, \mathbf{q}), \quad (2)$$

где $f(\psi, \mathbf{q})$ — функция меры повреждений ψ и вектора нагрузок $\mathbf{q}$. Вектор нагрузок является функцией

времени — $\mathbf{q}(t)$ и включает силовые, деформационные и температурные воздействия. В данном случае $\mathbf{q}(t)$ может быть представлен в виде суммы многоциклового упругой $\mathbf{q}_F(t)$ и малоциклового неупругой $\mathbf{q}_L(t)$ усталости.

Таким образом, для моделирования накопления повреждений в зимний период, когда происходит ускоренный выход из строя бандажей колес, предполагали сначала накопление повреждений от упругой и неупругой деформации, а затем рассматривали только малоцикловую ударно-контактную усталость от неупругого воздействия бандажа локомотивного колеса по стыкам рельсов. Величина накопленной поврежденности

$$\Psi = \Psi_F + \Psi_L = \sum_{i=1}^M \Psi_{Fi} + \sum_{j=1}^N \Psi_{Lj}, \quad (3)$$

где Ψ_{Fi} — усталостная поврежденность на i -м цикле; Ψ_{Lj} — контактно-усталостная поврежденность на k -м цикле; M, N — соответствующие показатели числа циклов.

Второе слагаемое в выражении (3) будет существенно зависеть от температуры ввиду значительного снижения ударной вязкости и соответствующей локализации пластических деформаций в зоне выкрашивания. Выражение для поврежденности при квазистатическом пластическом деформировании в условиях жесткого нагружения можно записать как [6]

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

где ε_{pj} — показатель пластической деформации за j -й цикл деформирования, при этом $\sum_{j=1}^K \varepsilon_{pj} = \varepsilon_{pc}$ (ε_{pc} — предельное значение деформации, характеризующее образование трещины).

Носителями повреждений в материале являются структурные несовершенства в виде микротрещин и микропор, неоднородностей, границ зерен, скоплений дислокаций и других дефектов на различных масштабах. К тому же динамическая деформация и сложное объемное напряженное состояние затрудняют применение уравнения (4). Более корректна замена деформации J -интегралом по всему контуру действующих в окрестности возникающей трещины деформаций:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \int_0^{J_{lc}} \frac{d(\Delta J_{Ij})}{J_{lc}(T)}, \quad (5)$$

где ΔJ_{Ij} — изменение значения J -интеграла за j -й цикл нагружения; $J_{lc}(T)$ — предельное значение J -ин-

теграла, 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.

Известна однозначная взаимосвязь трещиностойкости материала K_{Ic} с величиной его ударной вязкости. Можно воспользоваться корреляционной зависимостью, полученной В. С. Гиренко [7]:

$$K_{Ic} = \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} KCV}, \quad (6)$$

где KCV — ударная вязкость материала, Дж/см². Следует принять во внимание, что выражение (6) справедливо для оценки трещиностойкости при достижении материалом предельного состояния без значительных пластических деформаций, как это происходит в условиях хрупкого разрушения при низких температурах.

Усредняя динамическое воздействие на колесо по стыкам рельсов 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 [6]. Введем эффективный коэффициент интенсивности напряжений, характеризующий напряженно-деформированное состояние у вершины образовавшейся трещины малоциклового усталости:

$$K_{Ic3} = \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2} J_{Ij}}. \quad (7)$$

Сравнивая (6) и (7), приходим к выводу, что $J_{Ij} \approx 0,1 KCV$. Тогда для единичной трещины (дефекта) можно записать

$$\int_0^{J_{Ij}} \frac{d(\Delta J_{Ij})}{J_{Ic}(T)} = \int_{T_0}^{T_j} \frac{\Delta KCV(T)}{KCV_0} dT = \int_{T_0}^{T_j} \left(1 - \frac{KCV(T)}{KCV_0} \right) dT,$$

где KCV_0 — ударная вязкость при комнатной температуре T_0 ; T_j — температура эксплуатации колеса. Накопленную поврежденность, обусловленную малоциклового усталостью и зависящую от температурного режима эксплуатации, можно оценить с помощью следующего выражения:

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{yj}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right) dT, \quad (8)$$

где T_{yj} — температура эксплуатации на j -м участке пути (времени).

Интегральный эффект от различных дефектов, растущих и множащихся на нескольких структурных уровнях (масштабах) в пределах локальной области, можно учесть зависимостью, полученной ранее на основе логистического уравнения, или уравнения Фер-

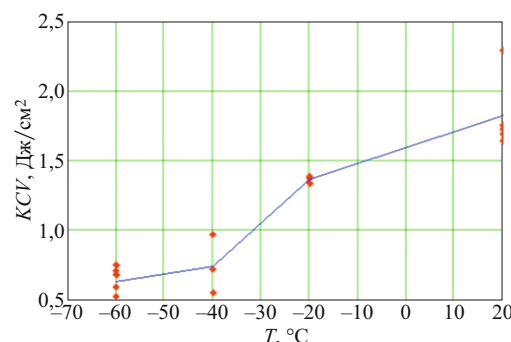


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от температуры (точки — экспериментальные данные)

хюльста, для динамики дефектов дислокационного и недислокационного происхождения [8]:

$$\frac{d\psi}{dt} = f(T, \sigma) \psi(1-\psi). \quad (9)$$

В случае приближенного решения этого уравнения [9] величина ударно-контактной поврежденности по стыкам рельсов (8) составит

$$\Psi_L = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{yj}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m dT, \quad (10)$$

где KCV_0 и KCV_j — ударная вязкость материала при комнатной температуре и соответствующая моменту j -го повреждения; $m \approx 0,25 - 0,3$ — эмпирический коэффициент, зависящий от материала и вида НДС. Выражение (10) может служить приближенной оценкой накопления общей поврежденности в материале бандажа локомотивных колес в условиях быстрого разрушения отколом при низких климатических температурах эксплуатации.

Согласно полученным результатам (см. табл. 3) ударная вязкость при снижении температуры испытаний с 20 до -60 °C падает в три раза. Несмотря на то, что сталь и обладает высокими механическими характеристиками, при понижении температуры ниже -30 °C (хотя минимально рекомендованная температура для этой стали -40 °C) материал претерпевает вязкохрупкий переход и энергия, необходимая для его разрушения, существенно падает. Вследствие этого снижается и сопротивление материала ударному воздействию, хотя прочность и удлинение (по данным статических испытаний) остаются достаточно высокими. Далее происходит локализация пластических деформаций, накопление микроструктурных повреждений и ускоренное образование усталостных трещин.

На рис. 1 представлена зависимость ударной вязкости от температуры, построенная по средним значениям, и отмечены величины, полученные экспериментально. Эта зависимость была аппроксимирована сплайнами для дальнейшего использования.

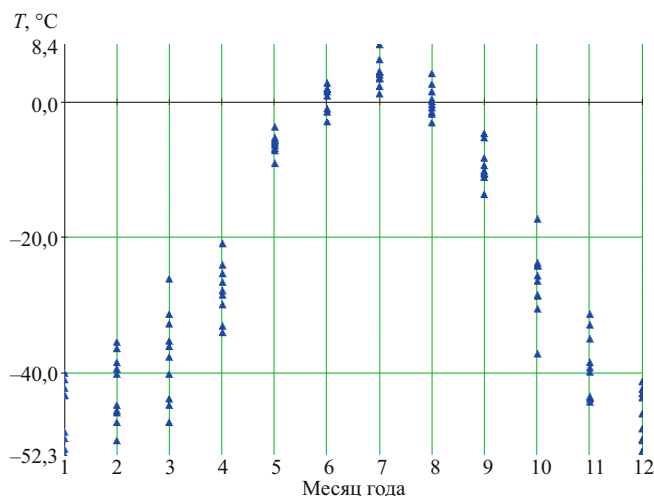


Рис. 2. Минимальные температуры окружающей среды на участке Алдан – Томмот за 2008 – 2012 гг., предоставленные метеослужбой Республики Саха (Якутия)

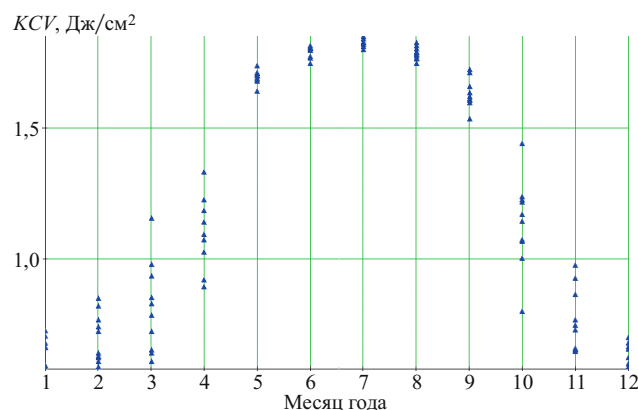


Рис. 3. Значения ударной вязкости, соответствующие минимальной температуре на участке Алдан – Томмот с 2008 по 2012 г.

Значение KCV при низких температурах испытаний уменьшается, что свидетельствует о снижении способности материала высвобождать энергию пластических деформаций и коррелирует с J_c — вязкостью разрушения. При равных значениях температуры такая связь ранее получена также экспериментально [10] для высокопрочной жаростойкой стали.

Чтобы оценить накапливаемые повреждения, использовали значения температуры окружающей среды на эксплуатируемом участке железной дороги.

Минимальная температура окружающей среды на эксплуатируемом участке Алдан – Томмот в основном ниже нуля (рис. 2) и значительно чаще — ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. элементы колеса эксплуатируются при пониженных значениях ударной вязкости. В то же время перепады средних температур окружающей среды — более $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. С учетом значений температуры, а также ударной вязкости, полученной в результате вышеописанных испытаний на ударный изгиб, можно утверждать, что в зимнее время материал бандажа локомотивного

колеса подвергается большой опасности, работая в неблагоприятной области с пониженной стойкостью к ударным нагрузкам и испытывая большие температурные напряжения.

На рис. 3 представлены вычисленные согласно сплайновой аппроксимации значения ударной вязкости материала бандажа локомотивного колеса, соответствующие минимальным температурам.

Для определения ресурса необходимо ввести условие разрушения, которое в общем виде будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{\text{ж}}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m dT = 1. \quad (11)$$

Достижение поврежденности значения, равного 1, будет соответствовать предельному числу нагружений и определять ресурс бандажа колеса.

Таким образом, на основании проведенных исследований предложен критерий разрушения (8), учитывающий как усталостный характер разрушения, так и ударное воздействие при прохождении рельсовых стыков, чувствительное к снижению температуры эксплуатации.

Возможен также учет геометрии образующихся при деформации бандажа колеса микротрещин, если принять во внимание следующую связь между энергетическим (J -интегралом) и деформационным (открытием трещины) критериями [11]:

$$J_c = m \sigma_{TD} \delta_c, \quad (12)$$

где σ_{TD} — динамический предел текучести; m — коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния (для случая плоской динамической деформации $m = 1,6$; δ_c — критическое раскрытие трещины — CTOD (crack tip opening displacement)).

Критическое значение раскрытия трещины может быть выражено в виде [12]

$$\delta_c = \frac{8 \varepsilon_p l_0 \sigma_{TD} (1 - \nu^2)}{\pi E}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_p = (l - l_0)/l_0$; l и l_0 — текущая и начальная длина трещины с пластической зоной; ν — модуль Пуассона; E — модуль Юнга. С учетом формул (9) и (10) перепишем выражение (5) в виде

$$\Psi_L = \sum_{j=1}^K \left(1 - \frac{e \sigma_{TD}^2}{e_{c0} \sigma_{TD0}^2} \right), \quad (14)$$

где $e = (l - l_0)$ и $e_{c0} = (l_c - l_0)$ — ширина пластической зоны [13]; l_c — критическая длина трещины. С помощью оптической микроскопии была определена критическая длина развивающейся трещины, соответствующая отколу, равная около 10 мм. Изучена также новая трещина, зарождающаяся на глубине 2 мм под отколом, длиной 340 микрон. Пластическая зона во-

круг новой трещины определяется остаточной деформацией зерен и примерно соответствует 70 – 100 мкм, вырастая для откола до 2 мм. Принимая $l_0 = 0,42$ мм, $l_c = 12$ мм, получаем среднее подрастание трещины за цикл, равное около 20 нм. Динамический предел текучести сильно зависит от температуры, что затрудняет расчет поврежденности. Тем не менее можно считать, что расчет по соотношению (14) возможен в случае установления связи характеристик ударной вязкости KCV и σ_{TD} [14].

В общем виде процесс накопления повреждений в бандаже локомотивного колеса можно представить в виде схемы, показанной на рис. 4. В результате контакта с рельсом и воздействия ударных нагрузок от рельсовых стыков происходит деформация микроструктуры поверхностного слоя на глубине 3 – 4 мм (наклеп). При воздействии на материал с деформированной структурой низких климатических температур повышается его твердость, ухудшаются механические характеристики: повышается предел текучести, снижается относительное удлинение образца; материал становится более хрупким. В подповерхностном слое (на глубине наклепанного слоя) происходит образование и рост микродефектов (микропор и микротрещин). Дальнейшее воздействие ударных от рельсовых стыков вызывает 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, сопротивление материала к большим воздействиям ударной нагрузки снижается.

Ударная нагрузка от рельсовых стыков значительно ухудшает условия работы, приводя к возникновению ряда опасных повреждений, помимо усталости металла, и может явиться причиной полного отказа колеса в эксплуатации, а также привести к крушению подвижного состава. Если учесть, что длина железнодорожного рельса на участке в среднем составляет 20 м, то может быть рассчитано количество циклов до разрушения от ударно-контактного нагружения. Зимой ресурс колеса от одной обточки до другой составляет всего два месяца, за каждый из которых оно пробегает в среднем 5500 километров. Ремонт занимает около одного месяца и включает обточку бандаж всех колес, независимо от индивидуальных повреждений. Усталостный износ в зимнее время практически отсутствует, количество циклов $K = 5,5 \cdot 10^5$, что соответствует малоцикловой усталости.

Согласно выражению (10), расчетная поврежденность $\psi_L = 0,851$.

Можно заключить, что проблема более высокой интенсивности образования поверхностных повреждений бандаж локомотивного колеса непосредственно связана с эксплуатацией его в условиях экстре-

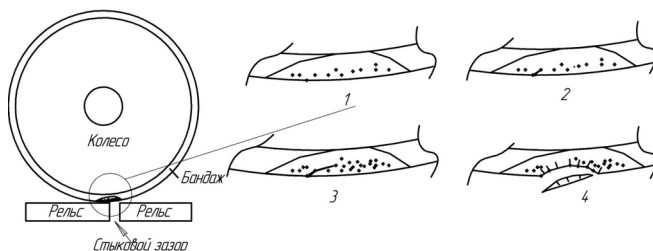


Рис. 4. Схема зарождения и распространения трещины с дальнейшим выкрашиванием на поверхности бандаж локомотивного колеса: 1 — образование микродефектов без взаимодействия друг с другом; 2 — слияние микродефектов; 3 — зарождение и рост трещины; 4 — выкрашивание металла на поверхности катания бандаж локомотивного колеса

мально низких климатических температур. Материал данного элемента колеса при понижении температуры окружающей среды быстро теряет вязкость динамического разрушения за счет резкой локализации пластических деформаций, тем самым изменяя характер накопленных повреждений.

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: ИМАШ УРО РАН, 2011.
2. Ибатуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. — 387 с.
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. Иванов В. В. Снижение ударного воздействия на колесо грузового вагона при прохождении рельсового стыка: дис. канд. техн. наук. — Омск, 2011.
5. Работнов Ю. Н. Избранные труды. Проблемы механики деформируемого твердого тела. — М.: Наука, 1991. — 196 с.
6. Справочник по сопротивлению материалов / Под. ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Наукова Думка, 1988. — 736 с.
7. Гиренко В. С., Котенков Э. В. Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных сталей и их сварных соединений / Автоматическая сварка. 1985. № 9. С. 13 – 20.
8. Архангельская Е. А., Лепов В. В., Ларионов В. П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды / Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 4. С. 81 – 87.
9. Lерov V. V. Structural evolution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials / World Journal of Engineering. 2012. Vol. 10(5). P. 205 – 212.
10. 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.
11. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Ч. 2. / Отв. ред. В. Трошенко. — Киев: Наукова думка, 1994. — 701 с.
12. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. — Киев: Наукова думка, 1968. — 246 с.
13. Хеллан К. Введение в механику разрушения. — М.: Мир, 1988. — 364 с.
14. Барахтин Б. К., Мешеряков Ю. И., Савенков Г. Г. Статистические характеристики множественного разрушения металлических мишеней при динамическом нагружении и их связь с механическими параметрами материалов / ЖТФ. 2010. Т. 80. № 1. С. 79 – 84.

REFERENCES

1. Grigor'ev A. V., Lepov V. V. Kontaktno-ustalostnye povrezhdeniya koles lokomotiva, éksploatiruемого v usloviyakh Severa [Contact fatigue damage of locomotive tire operated in the north environment] / Proc. of the V Ross. Sci.-Tech. Conf. "Resource and diagnostics of materials and structures." — Yekaterinburg: Izd. IMASH URO RAN, 2011 [in Russian].
2. Ibatullin I. D. Kinetika ustalostnoi povrezhdaemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloev [Kinetics of the Fatigue Damage and Fracture of Surface Layers]. — Samara: Izd. SGU, 2008. — 387 p. [in Russian].
3. Grigor'ev A. V., Lepov V. V. Mekhanizmy nakopleniya povrezhdenii i razrusheniya materiala oboda zheleznodorozhnogo kolesa pri éksploatatsii v usloviyakh Severa [The Mechanisms of Damage Accumulation and Fracture of Railroad Tire during the North Environment Operation] / Vestnik Sev.-Vost. Fed. Univ. 2012. Vol. 9. N 1. P. 79 – 85 [in Russian].
4. Ivanov V. V. Snizhenie udarnogo vozdeistviya na koleso gruzovogo vagona pri prokhozhdenii rel'sovogo styka [Lowering of the strike loading at freight stock wheel during rail joint passing]. Candidate's Thesis. — Omsk, 2011 [in Russian].
5. Rabotnov Yu. N. Izbrannye trudy. Problemy mekhaniki deformiruемого tverdogo tela [Selected Works. The Problems of the Deformable Solid Mechanics]. — Moscow: Nauka, 1991 [in Russian].
6. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Handbook of resistance of materials] / G. Pisarenko (ed.). — Kiev: Naukova Dumka, 1988 [in Russian].
7. Girenko V. S., Kotenkov É. V. Zavisimosti mezhdudarnoi vyazkost'yu i kriteriyami mekhaniki razrusheniya konstruktivnykh staley i ikh svarnykh soedinenii [The dependences between the impact toughness and fracture mechanics criteria for structural steels and their weld joints] / Avtomat. Svarka. 1989. N 9. P. 13 – 20 [in Russian].
8. Arkhangel'skaya E., Lepov V., Larionov V. The connected model for delayed fracture of damaged media / Phys. Mesomech. 2001. Vol. 4. N 5. P. 75 – 80 [translation from Russian].
9. Lepov V. V. Structural evolution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials / World Journal of Engineering. 2012. Vol. 10(5). P. 205 – 212.
10. Chernov V., Ermolaev G., Leontieva-Smirnova M. Impact toughness of EK-181 ferritic-martensitic chromium (12 %) steel under loading by concentrated bending / Technical Physics. 2010. Vol. 55. N 7. P. 985 – 990 [translation from Russian].
11. Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu. Spravochnoe posobie [Deformation and Fracture Strength of Materials. Handbook]. Part 2 / V. Troshchenko (ed.). — Kiev: Naukova dumka, 1994. — 701 p.
12. Panasyuk V. V. Predel'noe ravновesie khrupkikh tel s treshchinami [The limit equilibrium of brittle cracked bodies]. — Kiev: Naukova dumka, 1968. — 246 p. [in Russian].
13. Hellan K. Vvedenie v mekhaniku razrusheniya [Elementary fracture mechanics]. — Moscow: Mir, 1988. — 364 p. [Russian translation].
14. Barakhtin B., Meshcheryakov Yu., Savenkov G. Statistical characteristics of the multiscale spallation of metal targets during dynamic loading and their relation to the mechanical properties of the materials / Technical Physics. 2010. Vol. 55. N 1. P. 79 – 84 [translation from Russian].

УДК 620.171:621.921.34

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ КОМПОЗИТОВ С МАТРИЦЕЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ НА ИХ СВОЙСТВА

© С. Н. Махарова, С. П. Яковлева, М. И. Васильева,
А. В. Сивцева, В. Г. Яковлев¹

Статья поступила 15 октября 2014 г.

Исследованы алмазометаллические порошковые смеси, полученные при взрывном прессовании с последующей термообработкой компактов. Показано, что энергия взрыва, используемая на стадии формования порошков, дает возможность получать высокоэффективные алмазосодержащие материалы, в том числе на широко распространенных железоуглеродистых связках. Это обусловлено спецификой взрывного воздействия, в результате которого происходит активация материала связки, проявляющаяся при дальнейшем высокотемпературном нагреве в ее интенсивном упрочнении. Выявлено, что ударные волны создают термобарические условия, позволяющие обеспечить лучшую сохранность алмазной компоненты, чем при традиционных методах спекания. Получены образцы абразивных алмазных композитов с износостойкостью, соответствующей уровню износостойкости промышленных алмазных карандашей, но при вдвое меньшем расходе алмазного сырья.

Ключевые слова: алмазный порошок; алмазометаллический композит; взрывное прессование; структура; упрочнение; износостойкость.

Одной из самых прогрессивных технологий механической обработки является обработка алмазными инструментами, рабочие элементы которых чаще всего

выполнены из композиционных материалов. Несмотря на успехи в разработке алмазосодержащих композитов проблема создания достаточно универсальных высокотехнологичных абразивов с улучшенными эксплуатационными свойствами остается актуальной. Другой аспект проблемы — использование в ка-

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: spyakovleva@yandex.ru, snmachar@yandex.ru