

**О.П.Осташ, А.И.Бабаченко, И.М.Андрейко, В.В.Кулык, А.А.Кононенко**

## **СТРУКТУРНАЯ МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС**

*Физико–механический институт им. Г.В. Карпенко НАНУ, ИЧМ НАНУ*

Целью работы является разработка критериев, которые могут служить показателями надежности железнодорожных колес, особенно высокопрочных. Для оценки надежности железнодорожных колес в соответствии с условиями их эксплуатации обоснована необходимость использования характеристик трещиностойкости. Показано, что по показателям циклической трещиностойкости, характеризующим припороговый и среднеамплитудный участок кинетической диаграммы усталостного разрушения, колеса марки КП–Т практически не уступают аналогичным показателям для колес марки КП–2.

**Железнодорожные колеса, показатели надежности, критерии, трещиностойкость, диаграмма усталостного разрушения**

**Современное состояние вопроса.** Железнодорожные колеса в процессе эксплуатации испытывают воздействие статических, динамических и циклических нагрузок. Приложение тормозных усилий приводит к возникновению в них высоких термических напряжений, в результате чего на поверхности катания могут возникать трещины и другие дефекты теплового воздействия. Анализ условий эксплуатации железнодорожных колес показывает, что нормирование только таких механических свойств как временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость не может полностью гарантировать надежную работу этих изделий на протяжении длительного времени. Важным направлением в повышении эффективности оценки служебных свойств железнодорожных колес, в том числе высокопрочных, является разработка и использование новых критериев оценки их надежности.

Надежность является одним из основных комплексных показателей качества материала. В общем смысле суть надежности заключается в предотвращении преждевременных или непредвиденных отказов изделий. В материаловедении надежность – это свойство материалов выполнять свои функции, сохраняя устойчивые характеристики в определенных пределах в течение заданного времени в данных условиях эксплуатации. Так как обод колеса работает в паре трения с рельсом, то он, в первую очередь, должен обладать высокой износостойкостью, что определяется его твердостью. С другой стороны, для обеспечения эксплуатационной надежности необходимо, чтобы металл имел необходимый запас вязкости, что в некоторых случаях может быть связано со снижением его прочности (твердости). Эти противоположные требования по механическим свойствам определяют сложность проблемы повышения надежности колеса. Кроме того, применительно к железнодорожным колесам надежность должна обязательно включать понятие чувствительности материала к концентраторам

напряжений, так как в процессе их эксплуатации невозможно избежать образования дефектов на поверхности катания [1]. При неблагоприятном распределении эксплуатационных напряжений, недостаточной вязкости металла и высокой его чувствительности к концентраторам напряжений трещина будет расти до критической длины, что приведет к разрушению [2].

Испытания на ударный изгиб длительное время являлись практически единственным методом оценки чувствительности металла к концентраторам напряжений. Ударная вязкость, определяемая при испытаниях на ударный изгиб, является сложной комплексной характеристикой, зависящей от прочностных и пластических свойств металла. В ныне действующем межгосударственном стандарте на железнодорожные колеса ГОСТ 10791–2004 предусмотрено проведение факультативных испытаний на ударный изгиб образцов, вырезанных из обода колеса. Существенным недостатком этой характеристики является то, что знание ее уровня не дает возможности судить о напряжениях и деформациях, при которых происходит разрушение, поэтому невозможно использовать значения ударной вязкости в расчетах на прочность и долговечность изделий на этапе их проектирования.

**Постановка задачи.** В последние десятилетия получили развитие подходы механики разрушения, которые рассматривают прочность и долговечность тел с дефектами типа трещин, где напряженно–деформированное состояние материала около таких дефектов описывают с помощью коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), учитывающих характер и величину приложенных нагрузок, а также геометрию тела и дефекта. Для оценки сопротивления хрупкому разрушению была предложена новая характеристика материалов – вязкость разрушения  $K_{IC}$  – критический КИН, выше которого начинается спонтанное разрушение. Вязкость разрушения  $K_{IC}$  является структурно чувствительной характеристикой, а ее величина может изменяться в широких пределах в зависимости от структурно–фазового состояния колесной стали.

Однако, критический КИН  $K_{IC}$ , который характеризует граничное состояние материала только при статическом нагружении, не может в полной мере служить критерием надежности железнодорожных колес, особенно высокопрочных. В этих изделиях развитие трещины до своей критической длины происходит от концентратора напряжений (структурного или конструктивного) под действием циклических нагрузок, то есть путем субкритического подрастания усталостной трещины. Этот процесс описывается кинетическими диаграммами усталостного разрушения (диаграммами скоростей роста усталостной трещины), представляющими собой зависимости ( $da/dN - \Delta K$ ), на основании которых определяют характеристики циклической трещиностойкости (ЦТ) конструкционных материалов, среди которых основными являются порог усталости  $\Delta K_{th}$  – пороговый размах КИН, ниже которого не происходит роста усталостной трещины; циклическая вязкость разрушения  $\Delta K_{fc}$  – критический размах КИН, выше которого наступает спонтанное разрушение; параметры  $\Delta K^*$  и  $n$ , характеризующие среднеамплитудный участок диаграммы, соответствующий субкритическому росту трещины и описываемый известным уравнением Париса [3].

**Изложение основных материалов исследования.** Исследования стали для железнодорожных колес марок КП–2 (0,58% С; 0,64% Mn; 0,34% Si) и КП–Т (0,63% С; 0,72% Mn; 0,32% Si; 0,094% V; 0,16% Cr; 0,11% Ni; 0,05% Cu), показали [4], что при повышенной износостойкости высокопрочные колеса (сталь марки КП–Т), производимые по разработанной специалистами ИЧМ НАНУ и ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» технологии [5], по своим механическим характеристикам, определенным на гладких образцах (пределы текучести  $\sigma_{0,2}$  и прочности  $\sigma_B$ , твердость  $HB$ , предел выносливости  $\Delta\sigma_R$ ), на образцах с надрезом (усталостная долговечность  $N_f^{1,5}$  и  $N_f^{3,0}$  при радиусе надреза образца 1,5 мм и 3,0 мм соответственно) и на образцах с трещиной (порог усталости  $\Delta K_{th}$  и параметры  $\Delta K^*$  и  $n$ ), практически не уступают, а в некоторых случаях и превосходят, аналогичные показатели для колес марки КП–2 (табл.1). В этом случае коэффициент  $\beta$  в табл.1 близок или выше единицы.

Таблица 1. Сравнение ресурсных характеристик железнодорожных колес марки КП–2 и КП–Т

	Характеристики сталей									
	Гладкие образцы			Образцы с концентратором			Образцы с трещиной			
	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\Delta\sigma_R$	КСУ	$N_f^{1,5}$	$N_f^{3,0}$	$\Delta K_{th}$	$\Delta K^*$	$\Delta K_{fc}$	$n$
	МПа			Дж/см <sup>2</sup>	циклы $\cdot 10^3$ при $\Delta\sigma_{ном}=360$ МПа		МПа $\cdot \sqrt{м}$			
Сталь марки КП–Т	1080	1250	465	20,9	313	103	6,6	27,5	65	3,1
Сталь марки КП–2	670	1010	415	34,7	162	52	7,0	29,8	100	3,2
Соотношение ( $\beta$ )	1,61	1,24	1,12	0,60	1,93	1,98	0,94	0,92	0,65	0,97

Более низкие значения механических свойств для высокопрочных колес были получены для ударной вязкости КСУ и циклической вязкости разрушения  $\Delta K_{fc}$  (коэффициент  $\beta=0,65$  и  $\beta=0,60$  соответственно). Однако, следует отметить, что значения ударной вязкости высокопрочных колес КСУ = 20,9 Дж/см<sup>2</sup> превышают нормативный показатель (18 Дж/см<sup>2</sup>). Что касается вязкости  $\Delta K_{fc}$ , то этот показатель характеризует критическое состояние материала, при достижении которого наступает спонтанное разрушение. Такой ответственный вид стальных изделий как железнодорожные колеса в данном интервале напряжений по понятным причинам практически не работает.

Склонность к хрупкому разрушению может возрастать в условиях эксплуатации колес при низких климатических температурах вследствие явления хладноломкости, которое свойственно углеродистой стали, особенно при наличии дефектов типа трещин. Установлено, что в пределах припорогового и среднеамплитудного участка диаграммы скоростей роста усталостной трещины исследуемых сталей изменение температуры в интервале 20–60 °С практически не влияет на кинетику усталостного разрушения, а нестабильный рост усталостной трещины начинается тем раньше, чем ниже температура исследования (рис.1). В результате, циклическая вязкость разрушения  $\Delta K_{fc}$  исследованных сталей с понижением температуры от нормальной до –60 °С уменьшается в 2–3 раза.

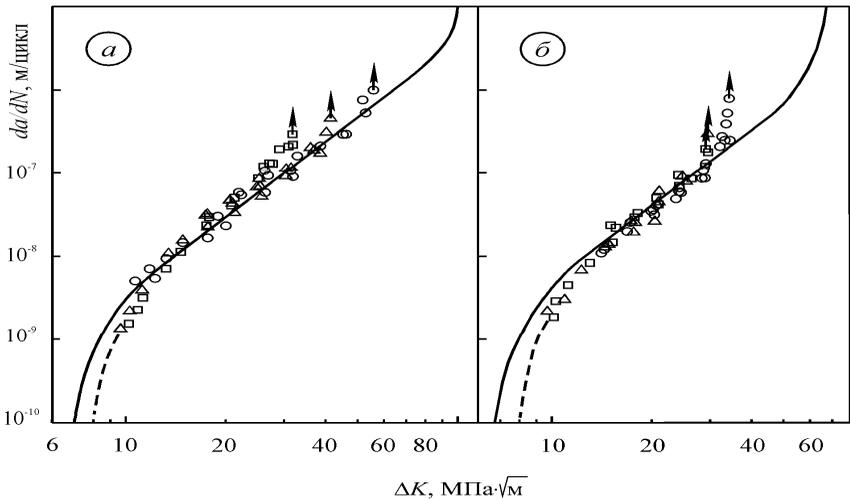


Рис. 1. Диаграммы скоростей роста усталостной макротрещины в колесах марки КП–2 (а) и КП–Т (б) при температуре исследования 20°С (сплошная кривая); –20°С (○); –40°С (△); –60°С (□).

Сравнительные исследования сталей КП–2 и КП–Т показали (рис.1), что обе стали склонны к низкотемпературному охрупчиванию. Преимущество стали КП–2 по величине  $\Delta K_{fc}$ , зафиксированное при нормальной температуре (табл. 1), уменьшается с понижением температуры исследований и при температуре –60°С разница между ними практически исчезает [6]. Микрофрактографический анализ показал, что в обеих сталях при низких и средних отклонениях  $\Delta K$  механизм низкотемпературного усталостного разрушения достаточно энергоемкий, в изломе преобладают деформационные гребни вследствие вязкого разрушения отдельных микрообъемов сталей (рис.2 а, б). При высоких отклонениях  $\Delta K$  скользящие фасетки доминируют в низкотемпературных изломах (рис. 2, в, г). Характер разрушения обеих сталей практически одинаковый, а уровень циклической вязкости разрушения  $\Delta K_{fc}$  обеспечивает наличие локальных актов микропластичности, отображением которых в из-

ломе являются деформационные гребни, которые окружают отдельные фасетки межзеренного скола. Более низкое значение  $\Delta K_{fc}$  стали КП–Т в сравнении со сталью КП–2 в интервале температур  $-20-40^{\circ}\text{C}$  (рис. 1) обусловлено частичной реализацией вторичного межзеренного растрескивания в некоторых микрообъемах стали (стрелки на рис.2, в).

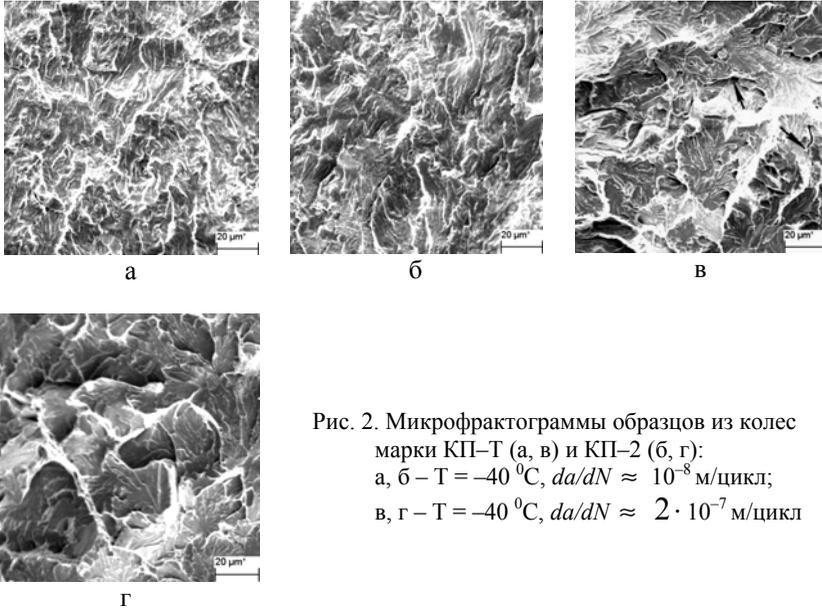


Рис. 2. Микрофрактограммы образцов из колес марки КП–Т (а, в) и КП–2 (б, г):  
 а, б –  $T = -40^{\circ}\text{C}$ ,  $da/dN \approx 10^{-8}$  м/цикл;  
 в, г –  $T = -40^{\circ}\text{C}$ ,  $da/dN \approx 2 \cdot 10^{-7}$  м/цикл

Известно, что в железнодорожных колесах в процессе термической обработки из-за различной скорости охлаждения отдельных элементов возникают остаточные напряжения, которые оказывают влияние на эксплуатационную надежность этих изделий [7]. В связи с этим, нормативными документами всех стран, в том числе и Украины, (ДСТУ ГОСТ 10791: 2006) не допускается формирование в ободе колеса остаточных растягивающих напряжений. Тем не менее, в процессе эксплуатации колес в отдельных случаях в результате теплового воздействия (торможения) может происходить перераспределение остаточных напряжений из сжимающих на растягивающие.

В этой связи представляет интерес моделирование влияния растягивающих остаточных напряжений на величину циклической вязкости разрушения путем повышения коэффициента асимметрии  $R$  с 0,1 до 0,5. Результаты исследований показали, что при  $R=0,5$  происходит снижение величины циклической вязкости разрушения как стали КП–2, так и КП–Т с  $90 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$  до  $71 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$  и с  $58 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$  до  $24 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$  соответственно. Этот факт надо учитывать при оценке экс-

плуатационной надежности железнодорожных колес, особенно работающих в условиях экстремального торможения.

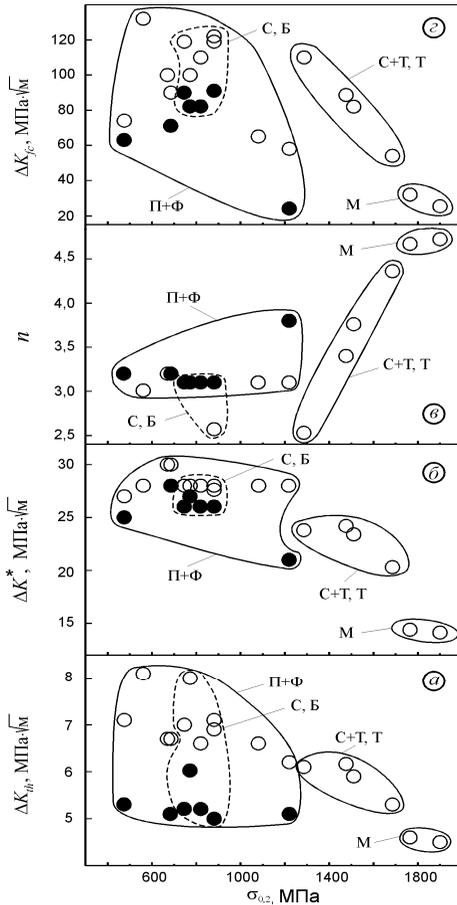


Рис. 3. Диаграммы конструкционной прочности колесных сталей в различном структурном состоянии: Ф – феррит; П – перлит; С – сорбит отпуска; Т – троостит отпуска; Б – бейнит; М – мартенсит; ○ – асимметрия цикла нагрузки R=0,1; ● – R=0,5.

Противоречивость требований к железнодорожным колесам по механическим свойствам делает необходимым поиск оптимальных соотношений между этими характеристиками. Структурная механика разрушения дает возможность устанавливать такие соотношения между прочностью (твердостью) и трещиностойкостью на основании диаграмм конструкционной прочности [8], представляющих собой зависимости характеристик трещиностойкости от предела текучести конструкционных материалов при статических [8] или циклических нагрузках. Анализ таких диаграмм [9], в частности полученных на основании данных

для колесной стали [10, 11], показывают (рис. 3), что порог усталости  $\Delta K_{th}$  и параметры  $\Delta K^*$  и  $n$  слабо зависят (изменения около 20–25%) от предела текучести стали в различном структурном состоянии, кроме мартенситной структуры (рис. 3 а–в). При этом, для циклической вязкости разрушения  $\Delta K_{fc}$  также отсутствует четкая обратная зависимость от предела текучести (рис. 3 г), а значения  $\Delta K_{fc}$  могут изменяться более чем в 2 раза. Видно, что максимальной циклической вязкостью разрушения обладают бейнитные структуры, а оптимальным сочетанием прочности и ЦТ (верхний правый угол диаграмм) – структуры отпуска. Следует отметить также, что даже при пределе текучести 1400–1500 МПа колесная сталь может иметь цик-

лическую вязкость разрушения выше нормативного значения  $K_{IC} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Важным фактором, влияющим на понижение характеристик ЦТ колесной стали является рост асимметрии цикла нагружения (рис.3).

**Заключение.** Показано, что для оценки эксплуатационной надежности железнодорожных колес наряду с традиционными показателями механических свойств (твердость, предел прочности, предел текучести, относительное сужение и ударная вязкость) необходимо использовать и критерии механики разрушения, в частности, характеристики циклической трещиностойкости.

Установлено, что при повышенной износостойкости высокопрочные колеса (сталь марки КП–Т) по своим механическим характеристикам, определенным на гладких образцах, на образцах с надрезом и с усталостной трещиной практически не уступают (за исключением циклической вязкости разрушения  $\Delta K_{fc}$  и ударной вязкости), а в некоторых случаях и превосходят аналогичные показатели для колес марки КП–2.

Установлено, что в пределах припорогового и среднеамплитудного участка диаграммы скоростей роста усталостной трещины исследуемых сталей изменение температуры испытаний в интервале  $20 \dots -60 \text{ }^\circ\text{C}$  практически не влияет на кинетику усталостного разрушения, а нестабильный рост усталостной трещины начинается тем раньше, чем ниже температура исследования.

1. *Динамическая жесткость тележки и дефекты на поверхности катания* // Железные дороги мира. – 2001. – №5. – С. 47–51. – Пер ст. В.Volf et al. Из журн.: Eisenbahningenieur. – 2000. – №8. – S.50–54.

2. *Эдель К.-О., Шапер М. Механика разрушения цельнокатаных колес* // Железные дороги мира. – 1994. – №2. – С. 22–28.

3. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др. // Под общ. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988–1990. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – 1990. – 680 с.*

4. *Втомна довговічність сталей залізничних коліс / О.П.Осташ, І.М.Андрейко, В.В.Кулик та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – №3. – С. 93–102.*

5. *Научная разработка и производственная реализация технологии микролегирования и термоупрочнения высокоизносостойких железнодорожных цельнокатаных колес / И.Г.Узлов, К.И.Узлов, О.Н.Перков, А.В.Кныш // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр. – 2004. – Вып. 7. – С. 231–243.*

6. *Низькотемпературна циклічна тріщиностійкість сталей залізничних коліс / О.П.Осташ, І.М.Андрейко, В.В.Кулик та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – №4. – С. 52–57.*

7. *Колесная сталь. / И.Г.Узлов, М.И.Гасик, А.Т.Есаулов, и др. // Киев: Техніка, 1985. – 168с.*

8. Романив О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. – М.: Металлургия, 1979. –176с.

9. Андрейко І.М., Кулик В.В., Осташ О.П. Вплив термообробки на міцність та циклічну тріщиностійкість сталей для залізничних коліс. // Машинознавство. – 2006. – №3. – С. 21–27.

10. Ярема С.Я., Попович В.В., Зима Ю.В. Влияние структуры на сопротивление стали 65Г росту усталостной трещины // Физ.–хим. механика материалов. – 1982. – №1. – С. 16–30.

11. Вплив режиму термічної обробки і асиметрії циклу навантаження на циклічну тріщиностійкість колісних сталей / О.П.Осташ, І.М.Андрейко, В.В.Кулик та ін. // Фіз.–хім. механіка матеріалів. – 2009. – №2. – С. 63–70.

*Статья рекомендована к печати:  
ответственный редактор  
раздела «Термомеханическая обработка проката»  
докт.техн.наук, проф. И.Г.Узлов  
рецензент канд.техн.наук М.Ф.Евсюков*

***О.П.Осташ, О.І.Бабаченко, І.М.Андрейко, В.В.Кулик, А.А.Кононенко***

**Структурна механіка руйнування і експлуатаційна надійність залізничних коліс**

Метою роботи є розробка критеріїв, що можуть служити показниками надійності залізничних коліс, особливо високоміцних. Для оцінки надійності залізничних коліс відповідно до умов їх експлуатації обґрунтовано необхідність використання характеристик тріщиностійкості. За показниками циклічної тріщиностійкості, що характеризують припорогові та середньоамплітудні ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування, колеса марки КП–Т практично не поступаються аналогічним показникам для коліс марки КП–2.