

**А.И.Бабаченко, А.А.Кононенко**

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС**

Проведен сопоставительный анализ существующих методов оценки чувствительности конструкционных сталей к концентраторам напряжений. Показана необходимость использования для оценки надежности железнодорожных колес критериев механики разрушения. Экспериментально определены параметры кинетических диаграмм усталостного разрушения стали для железнодорожных колес и установлена их зависимость от параметров микроструктуры.

**Введение.** Надежность является одним из основных комплексных показателей качества материала. В общем смысле суть надежности заключается в предотвращении преждевременных или непредвиденных отказов изделий. Применительно к материаловедению надежность – это свойство материалов выполнять свои функции, сохраняя устойчивые характеристики в определенных пределах в течение заданного времени в данных условиях эксплуатации.

**Современное состояние вопроса.** Надежность растет с увеличением однородности материала и уменьшением его чувствительности к концентраторам напряжений. Это связано с тем, что в реальных условиях эксплуатации материалы могут хрупко разрушаться из-за наличия различных концентраторов напряжений – механических надрезов, поверхностных или внутренних трещин, резких переходов от толстого к более тонкому сечению и др. Особенно это актуально для железнодорожных колес, так как в процессе их эксплуатации невозможно избежать образования дефектов на поверхности катания [1]. Железнодорожное колесо, являющееся одним из наиболее напряженных элементов подвижного состава, в процессе эксплуатации испытывает воздействие статических, динамических, циклических сил. Приложение тормозных усилий может способствовать возникновению в нем высоких термических напряжений, в результате чего на поверхности катания обода могут возникать трещины. При неблагоприятном распределении эксплуатационных напряжений, недостаточной вязкости металла обода и высокой его чувствительности к концентраторам напряжений трещина будет расти до своей критической длины, что может привести к разрушению [2]. Поэтому для оценки надежности железнодорожных колес необходимо также проведение испытаний по определению чувствительности стали к концентраторам напряжений.

Наиболее распространенные из них – испытания на статическое растяжение и изгиб образцов с надрезом. Наличие концентраторов существенно влияет на распределение нормальных напряжений. При других схемах статического нагружения влияние надрезов менее заметно. Критерием чувствительности материала к концентратору напряжений, как со-

ставляющей надежности, может служить отношение пределов прочности гладкого и надрезанного образцов ( $\sigma_b/\sigma_b^H$ ). Чем ниже указанное отношение, тем больше влияние вязкой составляющей материала при разрушении. Для высокопрочных сплавов отношение  $\sigma_b/\sigma_b^H$  обычно больше единицы. Испытания на растяжение надрезанного образца с перекосом еще более явно выявляют различия свойств гладких и надрезанных образцов [3].

Главным недостатком данного метода является то, что знание этого критерия не позволяет оценить параметры зарождения и развития трещины. Это можно сделать с помощью критериев линейной механики разрушения [4].

Наиболее распространенный из них – критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , являющийся силовой характеристикой трещиностойкости [5]. Испытания проводятся на образцах с надрезом и трещиной при статическом нагружении. Преимуществом  $K_{IC}$  по сравнению с другими характеристиками является то, что вязкость разрушения учитывает длину трещины. Поэтому, с использованием критического коэффициента интенсивности напряжений, можно рассчитать максимально допустимую нагрузку в конструкции с трещиной известных размеров, при которой она не будет развиваться до своей критической длины. Параметр  $K_{IC}$  отличается хорошей воспроизводимостью, независимостью от формы и размеров образцов при соблюдении определенных условий проведения испытаний (состояние плоской деформации у вершины трещины и упруго–напряженное состояние вдали от нее) [6]. Применяется данный критерий для оценки надежности высокопрочных сплавов, которые могут иметь удовлетворительные характеристики пластичности при испытаниях на статическое растяжение образцов без надреза и хрупко разрушаться при наличии концентраторов напряжений.

Для оценки сопротивления развитию трещин пластичных материалов, у которых не удастся корректно определить коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , используют критическое раскрытие трещины  $\delta_c$  (деформационный критерий трещиностойкости). Этот критерий можно использовать, например, для оценки стойкости против хрупкого разрушения стали [7]. Значение  $\delta_c$  определяется по результатам серии испытаний образцов с разной длиной усталостной трещины [6].

В случае, если разрушение сопровождается значительной пластической деформацией, для оценки сопротивления разрушению используют  $j$ -интеграл, определяющий интенсивность потока энергии в вершине трещины в момент начала ее роста (энергетический критерий разрушения). Его находят по диаграмме «нагрузка – смещение», записанной при испытании на изгиб или внецентренное растяжение [3].

$K_{IC}$ ,  $\delta_c$ ,  $j$  – интеграл характеризуют критическое состояние материала при статическом нагружении. Однако, в процессе эксплуатации различные изделия и конструкции часто подвергаются воздействию динамиче-

ских нагрузок. Так, например, железнодорожные колеса испытывают ударные нагрузки при движении на стыках рельс, и воздействие этих нагрузок больше, чем статических, определяемых только нагрузкой на ось [1]. В этом случае оценку их эксплуатационной надежности необходимо проводить с использованием также и результатов динамических испытаний, одними из самых распространенных среди которых являются испытания на трещоточный ударный изгиб образцов с надрезом. Испытания на ударный изгиб длительное время являлись практически единственным методом оценки чувствительности конструкционных материалов к концентраторам напряжений. Ударная вязкость, определяемая при испытаниях на ударный изгиб, является сложной, комплексной характеристикой, зависящей от совокупности прочностных и пластических свойств материала. Вычисляется она как отношение полной работы разрушения к площади поперечного сечения образца в месте надреза до испытания [8].

Однако, существует некоторая неопределенность при оценке стали по ударной вязкости. Повышению эффективности использования этой характеристики препятствует то, что при испытаниях на ударный изгиб не выполняется закон подобия [3]. На практике это означает невозможность сравнения результатов ударных испытаний, проведенных на образцах различных размеров либо с различным концентратором напряжений [3, 9, 10, 11].

Ударная вязкость состоит из двух слагаемых:  $a_n = a_3 + a_p$ , где  $a_3$  – работа зарождения трещины,  $a_p$  – работа распространения трещины. Характеристика  $a_n$ , не разложенная на составляющие, не дает достаточно полных данных о надежности материала. Множество исследовательских работ направлено на определение составляющих работы разрушения, разработке упрощенных методик их определения [12]. Однако основной проблемой для повышения эффективности использования этих характеристик является отсутствие единой точки отсчета, независимой от условий проведения динамических испытаний. В последнее время осуществлялся поиск в данном направлении [10, 11]. Но широкого применения предложенная методика не нашла, так как имеет ряд ограничений, связанных с особенностями изменения свойств металла при вязко-хрупком переходе. Реализовываются попытки решить эту задачу с привлечением физической теории разрушения металлов, основанной на концепции микроскола [13].

Существенным недостатком ударной вязкости является то, что знание этой характеристики не дает возможности судить ни о напряжениях, при которых происходит разрушение, ни о соотношении между пластической деформацией образца без разрушения и деформацией в процессе развития трещины. Невозможно использовать значения ударной вязкости и в расчетах на прочность и надежность изделий на этапе их проектирования.

Для определения качества металла железнодорожного колеса предусмотрены испытания на ударную вязкость при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  на образцах типа 1 по ГОСТ 9454–78 для диска и типа 8 для обода, при темпе-

ратуре  $-60^{\circ}\text{C}$  на образцах размером  $10 \times 10 \times 55$  мм с надрезом радиусом 5 мм и глубиной 2 мм для диска [14]. Таким образом, результаты этих испытаний не сопоставимы и невозможна их сравнительная оценка.

Как показывает анализ причин выхода железнодорожных колес из эксплуатации, во многих случаях это происходит из-за возникновения на поверхности катания трещин и их развития до своей критической длины под действием циклически повторяющихся эксплуатационных нагрузок [15]. В связи с этим для обеспечения надежности железнодорожных колес необходимо использовать критерии, характеризующие поведение стали при усталостном нагружении.

При таком виде испытаний на образец действуют циклические напряжения, непрерывно изменяющиеся по величине. Под их воздействием в металле зарождаются и постепенно развиваются трещины, вызывающие в конечном итоге полное разрушение детали или образца. Это разрушение особенно опасно еще и потому, что может протекать под действием напряжений, значительно меньших пределов прочности и текучести [3].

Наиболее точно существующая в эксплуатации схема циклического нагружения железнодорожных колес воспроизводится при проведении натуральных испытаний. Однако эти испытания очень дорогостоящие, и их проведение требует применения мощного испытательного оборудования. В ИЧМ НАНУ была разработана методика и устройство для испытания на многоцикловую усталость полунатурных образцов [16]. Характер зарождения и развития трещины на испытуемых фрагментах колес близок к реальным условиям эксплуатации. Недостатком данного метода является то, что единственным критерием, который определяется при таких испытаниях, является количество циклов нагружения до разрушения.

Однако, при проведении натуральных испытаний не представляется возможным изучать кинетику развития усталостной трещины в исследуемых изделиях. Поэтому самым эффективным способом определения параметров зарождения и развития усталостной трещины является проведение усталостных испытаний с построением кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Из этой диаграммы определяется уровень напряжений, при которых будет происходить развитие трещины в материале; размер критической длины трещины, который характерен для данной стали с заданным структурным состоянием; скорость роста усталостной трещины на различных этапах ее развития, и т.д.

**Изложение основных материалов исследования.** В данной работе были проведены исследования влияния скорости охлаждения при термическом упрочнении железнодорожных колес на параметры кинетической диаграммы усталостного разрушения. Материалом для исследований была выбрана углеродистая сталь, применяемая для производства железнодорожных колес, следующего химического состава:  $\text{C}=0,49\%$ ,  $\text{Mn}=0,73\%$ ,  $\text{Si}=0,25\%$ ,  $\text{S}=0,019\%$ ,  $\text{P}=0,017\%$ .

Для получения различных скоростей охлаждения (1, 6 и 10<sup>0</sup>С/с) ускоренное охлаждение опытных проб из аустенитного состояния проводилось в различных средах. Температура нагрева была одинаковая для всех вариантов термической обработки и составляла 850<sup>0</sup>С.

Исследования проводились на компактных образцах толщиной 30 мм, нагружаемых по схеме внецентренного растяжения с использованием универсальной испытательной машины ЭДЦ–20.

На рис. 1 представлены кинетические диаграммы усталостного разрушения исследуемой стали после охлаждения из аустенитной области с различными скоростями.

Анализ результатов исследований кинетики развития усталостной трещины показывает (рис.1, табл.1), что ускоренное охлаждение приводит к повышению как порогового  $K_{th}$ , так и критического  $K_{fc}$  коэффициентов интенсивности напряжений.

Таблица 1. – Параметры КДУР исследуемой углеродистой стали

Скорость охлаждения, <sup>0</sup> С/сек	Параметры КДУР			
	Пороговый коэффициент $K_{th}$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	$K^*$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	n	$K_{fc}$ , Н/мм <sup>3/2</sup>
1	450	920	3,08	2254
6	580	1150	3,14	2732
10	760	1110	2,94	2928

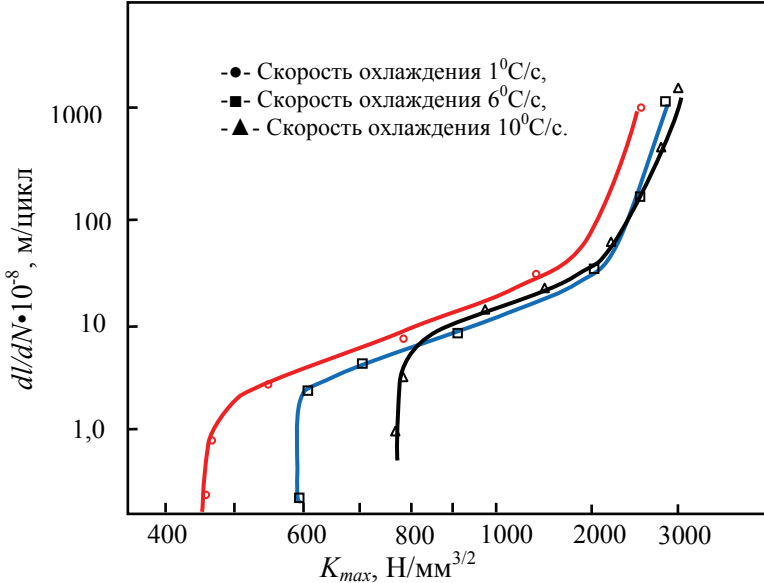


Рис.1. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения углеродистой стали (C=0,49%)

Однако степень влияния скорости охлаждения углеродистой стали на эти показатели различна. Если повышение скорости охлаждения в интервале  $1-10^0\text{C}/\text{с}$  приводит к росту критического коэффициента интенсивности напряжений исследуемой стали на 29%, то пороговый коэффициент при тех же условиях повышается на 69%. Такая различная чувствительность исследуемых параметров к структурным изменениям, происходящим в углеродистой стали при ускоренном охлаждении, по видимому, связана различными по морфологическим особенностям механизмами распространения усталостной трещины при низких и высоких напряжениях (пороговый и критический коэффициенты интенсивности напряжений) [17].

**Вывод.** Результаты исследований показали, что в настоящее время для обеспечения надежности железнодорожных колес необходимо наряду со стандартными характеристиками механических свойств использовать и параметры, характеризующие процесс зарождения и развития усталостной трещины. В работе экспериментально получены кинетические диаграммы усталостного разрушения углеродистой стали ( $C=0,49\%$ ), применяемой для производства железнодорожных колес. Установлено, что повышение скорости охлаждения исследуемой стали в интервале от  $1^0\text{C}/\text{с}$  до  $10^0\text{C}/\text{с}$  приводит к росту как порогового  $K_{th}$ , так и критического  $K_{fc}$  коэффициентов интенсивности напряжений.

Показано, что различная чувствительность исследуемых параметров КДУР к изменению структурного состояния углеродистой стали при охлаждении со скоростями  $1-10^0\text{C}/\text{с}$  связана с различными по морфологическим особенностям механизмами распространения усталостной трещины при низких и высоких напряжениях.

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. *Мешков Ю.Я.* Физические основы разрушения стальных конструкций. – К.: Наукова думка, 1981. – 240 с.
3. *Золоторевский В.С.* Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
4. *Броек Д.* Основы механики разрушения. Пер с англ. – М.: Высшая школа, 1980. – 308 с.
5. *Структура та опір руйнуванню залізуглецевих сплавів* / О.П.Осташ, І.П.Волчок, О.Б.Колотілкін та ін. – Львів: НАНУ ФМІ, 2001. – 272с.
6. *Гешелин В.Г.* Сертификация и качество металлопродукции. Методы, средства и метрологическое обеспечение механических испытаний. – Х.: Факт, 2004. – 480 с.
7. *Влияние углерода и структурного состояния стали на критическое раскрытие трещины* / В.М.Кондратенко, В.Г.Гешелин, Н.И.Падун и др. // Термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1978. – №7. – С.81–82

8. *ГОСТ 9454*. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 12 с.
9. *Сафта В., Бернат А., Мойса Т.* Связь между характеристиками динамической вязкости разрушения // Заводская лаборатория. – 1981. – Т. 47, №7. – С. 72–75
10. *Маслюк В.М.* Определение ударной вязкости низколегированных сталей с учетом трапециевидности излома образцов // Заводская лаборатория. – 1995. – Т. 61, №6. – С. 48–51.
11. *Маслюк В.М.* Оценка стали массового производства ответственного назначения по характеристикам ударной вязкости // *Металлург*. – 2006. – №6. – С. 54–56.
12. *Гуляев А.П.* Разложение ударной вязкости на ее составляющие по данным испытания образцов с разным надрезом // Заводская лаборатория. – 1967. – Т. 33, №4. – С. 473–475.
13. *Мешков Ю.Я., Пахаренко Г.А., Седых С.Н.* Вязкость термически упрочненной стали в изделиях и конструкциях. // Производство и свойства термически обработанного проката. – М.: *Металлургия*, 1988. – С.30–33.
14. *ГОСТ 10791*. Колеса цельнокатаные. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 28с.
15. *Эдель К.-О., Шанер М.* Механика разрушения цельнокатаных колес // Железные дороги мира. – 1994. – №2. – С.22–28.
16. *В.Г. Гешелин* Перспективные методы и средства для механических испытаний эффективных видов продукции // *Черная металлургия*. – М.: *Металлургия*, 1989. – с. 390–395.
17. *Ярема С.Я.* Исследование роста усталостных трещин и кинетическая диаграмма усталостного разрушения // *ФХММ*. – 1977. – №4. – С.3–22.

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. И.Г.Узловым*