

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ БЕЗОПАСНЫХ ДЕФЕКТОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ  
ОСЯХ КОЛЕСНЫХ ПАР, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ  
ТЕМПЕРАТУР

Соин К. А.

ОАО НПО "ЦНИИТМАШ", Москва, Россия  
kestmifi@mail.ru

Оси колесных пар, являющиеся одними из ответственных конструктивных компонентов железнодорожного подвижного состава, в процессе эксплуатации подвергаются интенсивным знакопеременным вращательно-изгибным циклическим нагрузкам, обуславливающим тяжелые условия работы осей.

Основными силовыми факторами, действующими на ось является вес вагона с грузом, динамические усилия от колебаний вагона на рессорах и силы от удара колес на стыках рельсов, а также боковые нагрузки, обусловленные действием инерционных сил при движении вагона по криволинейным участкам пути. Местами приложения сил к оси являются шейки и подступичные части. Имеются также остаточные напряжения и местные сборочные напряжения у ступичной части, возникшие при посадке колеса на ось.

По данным "Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)" нагруженность осей характеризуется следующими параметрами:

1. Число циклов нагружения

$$N_c = \frac{365 P_c T_p 10^3}{\pi d_k (1 + k_n)}$$

где  $P_c$  - средний суточный пробег (по данным конкретных депо);

$T_p$  - расчетный срок службы оси (или время между ППР);

$d_k$  - диаметр круга катания, м;

$k_n$  - коэффициент порожнего пробега (отношение пробега в порожнем состоянии к пробегу в нагруженном состоянии, для пассажирских вагонов  $k_n = 0$ ).

2. Максимальная нагрузка на шейку

$$P = P_{cm} + P_\delta + P_u,$$

где  $P_{cm}$  - статическая весовая нагрузка, приложенная к шейке оси;  $P_\delta = P_{cm} k_{\delta os}$  - вертикальная динамическая нагрузка от колебаний кузова на рессорах ( $k_{\delta os}$  - коэффициент динамики, для грузовых 4-х осных вагонов  $k_{\delta os} = 0.33$ );

$P_u$  - нагрузка от действия центробежных сил в кривых,  $P_u = \frac{P_{cm}}{g} \gamma_u \frac{h_u}{l}$ , где  $\gamma_u$  - допустимое непогашенное центробежное ускорение вагона в кривой,  $\gamma_u = 0.07g$ ;

$h_u$  - высота центра тяжести полностью загруженного вагона над уровнем осей колесных пар;  $l$  - половина расстояния между точками приложения вертикальной силы к шейкам оси ( $P_u \cong 0.07 P_{cm}$ ).

Таким образом максимальная нагрузка на шейку оси составляет  $P \cong 1.4 P_{cm}$ . Для грузовых вагонов  $P_{cm}=11.5$  т, для пассажирских  $P_{cm}= 8.85$  т. Боковая сила, приложенная к колесу, движущемуся по наружному рельсу кривой  $H_1 = 2.9$  т ( для грузового вагона). Приведенные выше значения соответствуют максимально возможным.

В настоящей работе механические свойства металла осей определялись по данным испытаний на статическое растяжение, ударный изгиб, статическую и циклическую трещиностойкость. Помимо годных осей, прошедших УЗК, исследовался металл осей, забракованных по прозвучиванию. Браковочным признаком является затухание УЗ сигнала, превышающее нормированный уровень, что является индикатором наличия крупнозернистой структуры металла и соответственно низких эксплуатационных свойств оси /1-2/.

В связи с отмеченным, для проведения механических испытаний были отобраны шесть осей типа РУ1Ш, три из которых прошли УЗ контроль, и три были забракованы по прозвучиваемости.

В таблице 1 приведены полученные результаты испытаний на растяжение (средние значения по трем образцам для каждой оси).

Таблица 1 - Механические свойства металла осей.

	№ оси	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$T_{k0}$	$T_0$
оси, прошедшие УЗК	6	287	591	25.9	47	+30	-
	1	381	757	23.8	51	+10	0
	2	325	646	22.5	48.8	+25	+2
забракованные оси	5	318	649	19	33	+60	-
	3	327	627	25	45	+70	+36
	4	310	618	25	44	+60	+37

Исследование характеристик циклической трещиностойкости проводилось на компактных образцах типа СТ-1. Испытания осуществляли при внецентренном растяжении при  $T = 20$  °С и  $T = -40$  °С и коэффициенте асимметрии цикла  $R = 0$ . По данным этих испытаний были построены кинетические диаграммы усталостного разрушения в координатах: скорость роста трещины ( $dl/dN$ ) – размах коэффициента интенсивности напряжений ( $\Delta K$ ), рис.1.

Кинетическая диаграмма развития дефектов в области низких скоростей их распространения имеет излом и два характерных участка: - область, в которой скорость развития дефекта описывается уравнением Пэриса  $dl/dN = C_0 \cdot \Delta K^n$  и область интенсивного замедления роста дефекта ниже порогового значения  $\Delta K_{th}$ , разделяющего эти участки, для которой  $dl/dN = C_{th} * \Delta K^{n_{th}}$ . В данных соотношениях  $dl/dN$  - изменение размера дефекта за один цикл нагружения  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  - размах коэффициента интенсивности напряжений;  $C_0, C_{th}, n, n_{th}$  - характеристики материала.

На рис.1 приведены результаты испытаний на циклическую трещиностойкость металла годных и забракованных по прозвучиванию осей при температуре 20 и минус 40 °С. Как видно из рис.5 величина  $\Delta K_{th}$  для забракованных осей, имеющих крупное зерно, несколько выше, чем для годных. В области выше порогового значения  $\Delta K_{th}$

скорость роста трещин в забракованных осях выше, а при  $\Delta K < \Delta K_{th}$  ниже, чем в годных осях. Снижение температуры до минус 40 °С практически не влияет на скорость роста трещины при циклическом нагружении.

В таблице 2 приведены значения констант уравнения скорости роста трещин (для верхних огибающих) для металла годных и забракованных осей, а также огибающая всего массива данных.

Таблица 2 - Параметры кинетического уравнения скорости роста трещины металла осей (верхняя огибающая).

оси	$C_0$ ,	$n$ ,	$\Delta K_{th}$ , МПа м <sup>1/2</sup>	$C_{th}$ ,	$n_{th}$ ,
прошедшие УЗК	$10^{-9}$	3.4	19.5	$2 \cdot 10^{-44}$	30.4
забракованные	$5 \cdot 10^{-12}$	5.2	28	$8 \cdot 10^{-65}$	41.7
весь массив	$7 \cdot 10^{-12}$	5.2	19.5	$2 \cdot 10^{-44}$	30.4

Учитывая уровень действующих на оси нагрузок можно отметить, что развитие дефектов в процессе эксплуатации происходит преимущественно в припороговой области, где снижения свойств металла забракованных по прозвучиванию осей не установлено.

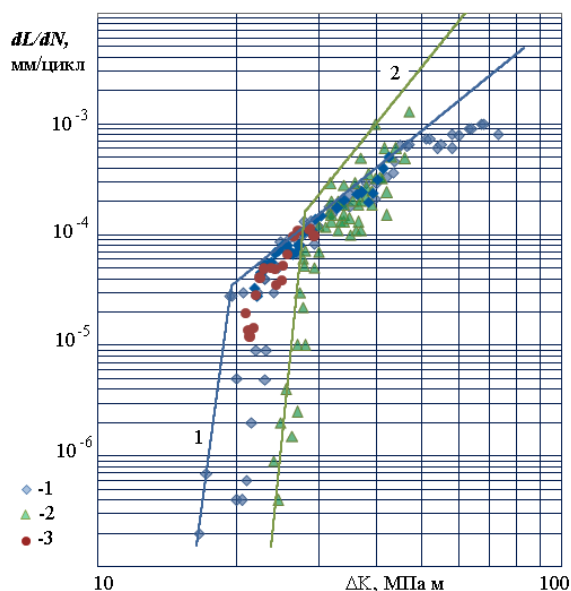


Рисунок 1 - Зависимость скорости роста трещины металла осей от коэффициента интенсивности напряжений. 1, 3 – оси, прошедшая УЗК (1- T=20°C, 3 -T=-40 °C); 2 – оси, забракованные по прозвучиванию, T=20 °C.

Для осей колесных пар характерно циклическое нагружение, с количеством циклов порядка  $N=10^9$  за срок эксплуатации. Таким образом, для определение допускаемых размеров дефектов необходимо располагать данными по закономерностям развития трещин при скоростях порядка  $10^{-9} - 10^{-8}$  мм/цикл, т.е. при  $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ .

Важнейшим вопросом при этом является определение порогового значения размаха коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) в зависимости от асимметрии цикла нагружения  $R$ .

Обобщение данных исследований и нормативной методики [6], позволило предложить расчетную зависимость порогового размаха КИН от асимметрии цикла в следующей форме:  $\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} * (1 - R)^{0.6}$ , при  $R \leq 1$  и  $\Delta K_{th} = 20 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ , при  $R > 1$ , где  $\Delta K_{th0} = 6 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ , рис.2.

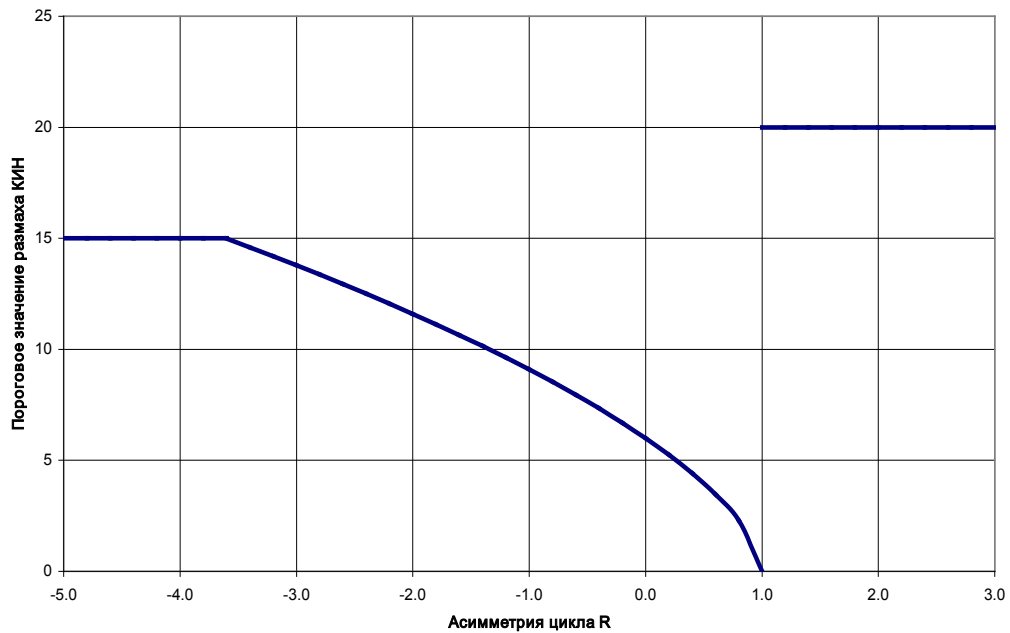


Рисунок 2- Расчетная зависимость порогового значения КИН от асимметрии цикла.

В связи с ограниченным объемом экспериментальных данных для материала осей в качестве расчетной зависимости для распространения дефекта на уровне выше порогового значения КИН использовалась нормативная зависимость [6]

$$v = C_0 * [\Delta K]^n, \text{ где } C_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ мм/цикл}, n = 2.9.$$

Для нормативной зависимости величина  $\Delta K_{th} = 6 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$ . В уравнении для припороговой области для консервативности принято значение показатель степени  $n_{th} = 8$ . Второй параметр уравнения определяется из условия непрерывности зависимости скорости роста трещины выше и ниже порогового значения и составляет

$$C_{th} = \frac{C_0}{(\Delta K_{th})^{n_{th}-n}}$$

Расчетная зависимость скорости роста трещины, определяемая данными параметрами располагается выше и левее всего массива экспериментальных данных для нормальных и забракованных осей на рис.1.

Расчет развития дефекта в одном цикле нагружения производится в следующей последовательности

- Расчет размаха КИН от циклических составляющих напряжений
- Расчет КИН от среднего напряжения цикла
- Расчет коэффициента асимметрии  $R$
- Расчет порогового значения размаха КИН.
- Расчет подроста дефекта в точке А и С с учетом уровня  $\Delta K$  (выше или ниже порогового значения)
- Расчет размера дефекта после цикла нагружения  $a = a + v_A, c = c + v_C$ .

На основе представленной методики в среде MathCad была написана программа, позволяющая рассчитывать кинетику роста дефектов в оси.

На рисунке 3 в качестве примера показана форма контура поверхностных дефектов в галтели шейки с начальными размерами 4x12 мм (а) и 4x40 мм (б) в процессе их развития.

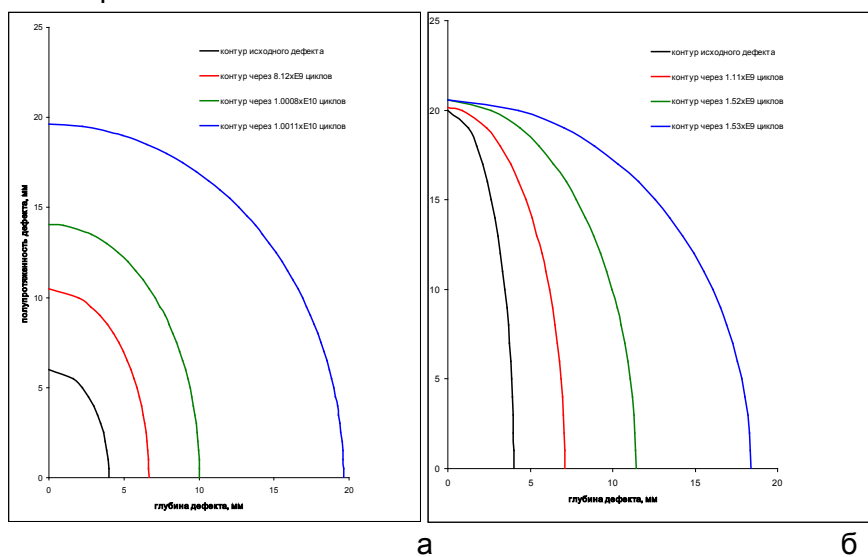


Рисунок 3 - Результаты расчета развития дефекта в галтели шейки (15 мм от торца предподступицы)

### Литература

1. СТО РЖД 1.11.001-2005. Контроль неразрушающий приемочный. Оси колесных пар подвижного состава. Методические указания по ультразвуковому контролю. Стандарт ОАО "РЖД" – М.: 2005, 32 с.
2. Расчет основных частей вагонов. - Справочное руководство, М.: Транспорт, 2000, 420 с.
3. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, м., Энергоатомиздат, 1989 г.. 528 с.
4. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Госстандарт СССР, Москва, 61с.
5. ASTM E 1921-05. «Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range», in: Annual Book of ASTM Standards, vol.03.01, pp. 1068-10841.
6. .РД ЭО 0330–01. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР И ЭГП на стадии эксплуатации. М., Федеральное агентство по атомной энергии. 2004, 136 с.
7. Л.М. Школьник, Ю.Е. Коваленко, Н.И. Мартынов, Л.А. Усова. Полые оси и валы. М.- Машиностроение, 1968,184 с.
8. МР 125-02-95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами, М., НПО ЦНИИТМАШ, 1995, 52 с.
9. В.А. Гапанович, А.Х. Вopilкин, А.К. Гурвич, А.Г. Казанцев, Д.А. Кононов. Определение остаточного ресурса объектов повышенной опасности. В мире неразрушающего контроля. 2006, №4(34). с.75-77.
10. Gravier et. Al. Revue Generale des Chemins de Fer, 1999, №3, p.33-40. (Прогнозирование срока службы осей колесных пар).