

# Оценка процесса развития трещин в оси колесной пары

Случаи аварий, такие, например, как излом оси колесной пары поезда ICE в июле 2008 г. на мосту Хоенцоллернбрюкке в Кёльне, всегда служат поводом для дискуссий о частоте проведения контрольных проверок. После указанной аварии началась интенсивная работа по выработке надежных критериев для определения интервалов между такими проверками. При этом большое внимание было уделено обзору фаз всего срока службы циклически нагружаемых деталей и узлов подвижного состава, и в частности определению срока службы осей колесных пар.

Если начинать исследование работы абсолютно исправной детали от момента принятия ее в эксплуатацию, то длительность ее работы до обнаружения дефекто-скопом первой трещины составит большую часть общего срока службы. Эта первая фаза общего срока службы может сократиться, если еще на стадии изготовления возникли и не были обнаружены дефекты или в процессе эксплуатации появились повреждения вследствие коррозии или ударов частиц щебня, инициировавших развитие трещин.

Сравнительно продолжительный срок службы до возникновения первой трещины еще не дает повода для установления увеличенного интервала проверок. Наоборот, именно более короткая фаза развития трещин должна быть принята за основу при решении этого вопроса. В принципе речь идет о том, какие конкретно трещины (по размеру, ориентации) могут быть надежно обнаружены с помощью неразрушающих методов контроля. Для срока службы деталей при наличии растущих трещин большое значение имеет множество влияющих факторов.

## Основные принципы развития усталостных трещин

При усталостном разрушении общий срок службы детали разделяется на две части, а именно на время до возникновения трещины и период ее развития. Поскольку для определения интервала контрольных проверок колесной пары имеет значение фаза развития трещины, здесь важно исследовать при-

чины усталостного развития этого дефекта.

При изменяемом во времени нагружении детали или у вращающихся деталей вокруг трещины возникает зависящее от времени поле напряжений  $\sigma_y(x, t)$ , которое может характеризоваться интенсивностью напряжений  $K(t)$ , также являющейся функцией времени, как показано на рис. 1. Циклическая интенсивность напряжений  $\Delta K$  является самым важным показателем развития трещин при усталостном нагружении.

При циклическом напряжении  $\Delta\sigma$ , актуальной длине трещины  $a$  и геометрическом коэффициенте  $Y(a)$  можно получить циклический коэффициент интенсивности напряжения  $\Delta K$  в виде зависимости

$$\Delta K = \Delta\sigma (\pi a)^{1/2} Y(a). \quad (1)$$

Влияние на процесс развития усталостных трещин оказывает также так называемое отношение  $R$  периодически меняющейся нагрузки на исследуемую деталь:

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}. \quad (2)$$

В процессе своего развития трещина удлиняется по мере увеличения числа циклов нагрузки, при

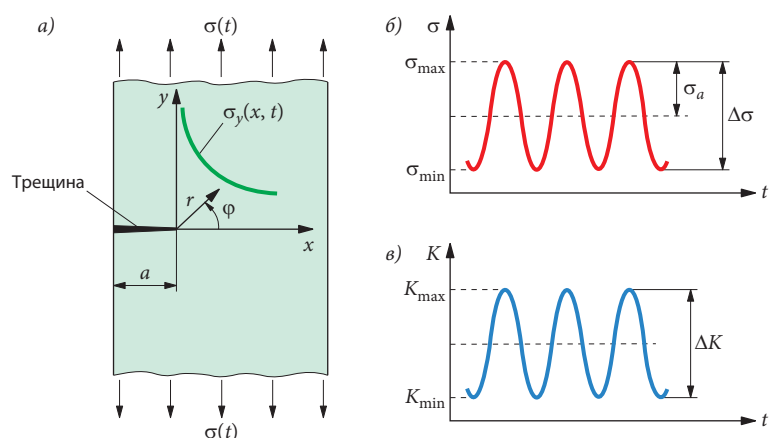


Рис. 1. Зависимости между нагрузкой детали и циклическим коэффициентом напряжений:

$a$  — деталь с трещиной длиной  $a$  при изменяющейся во времени нагрузке и полярных координатах вершины трещины  $r$  и  $\phi$ , а также кривая напряжений  $\sigma_y(x, t)$  в зоне расположения трещины;  $b$  — нагрузка детали  $\sigma(t)$  с амплитудой  $\sigma_a$ , диапазоном колебаний  $\Delta\sigma$  и экстремумами  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ ;  $c$  — коэффициент интенсивности напряжений  $K(t)$  с циклической интенсивностью  $\Delta K$  и экстремумами  $K_{\max}$  и  $K_{\min}$

этом возрастает циклический коэффициент интенсивности напряжений. Скорость развития трещины зависит от материала детали и определяется экспериментально. Такие испытания на стандартных образцах позволяют получить так называемую кривую скорости развития трещин, которая асимптотически приближается к двум пределам (рис. 2):

$$da/dN = f(\Delta K). \quad (3)$$

Нижний предел представляет собой пороговое значение  $\Delta K_{th}$  циклической интенсивности напряжений. Если величина циклической интенсивности напряжений  $\Delta K$  лежит ниже порогового значения, то усталостная трещина согласно классической теории механического разрушения не может расширяться. Второй предел  $\Delta K_C$  определяет нагружение трещины, при котором ее распространение приводит к разрушению детали. Условием для этого служит то, что  $K_{max}$  достигает значения  $K_C$  в соответствии с выражением

$$\Delta K = \Delta K_C = (1 - R) K_C. \quad (4)$$

Форма кривой развития трещины зависит от разнообразных влияющих факторов, например коэффициента  $R$ , свойств материала, его микроструктуры, температуры и состава окружающего воздуха. Влияние этих факторов сказывается по-разному в зонах малой (1), средней (2) и низкой (3) скорости развития трещины.

Например, с увеличением коэффициента  $R$  скорость развития трещины  $da/dN$  возрастает. Однако влияние коэффициента  $R$  в нижнем и верхнем диапазонах скорости развития трещин проявляется сильнее, чем в среднем.

Для того чтобы получить выражение для расчета вероятного срока службы, необходимо использовать описание кривой скорости развития трещины в виде

$$da/dN = f(\Delta K, R). \quad (5)$$

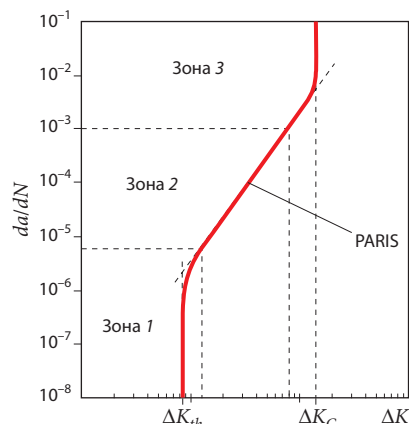


Рис. 2. Зависимость между скоростью роста трещин  $da/dN$  и циклическим коэффициентом интенсивности напряжений  $\Delta K$

Для этого можно воспользоваться уже разработанными многочисленными концепциями представления процесса развития трещин.

Так называемый закон PARIS описывает только средний диапазон кривой развития трещин:

$$\frac{da}{dN} = C_p \Delta K^{m_p}, \quad (6)$$

где  $C_p$  и  $m_p$  являются величинами, зависящими от свойств материала, причем коэффициент  $C_p$  зависит также от соотношения напряжений  $R$ .

Поскольку этот закон не способен отображать нижний диапазон скорости развития трещин, его можно использовать для прогнозирования срока службы только в ограниченной мере. В общем случае он дает консервативные оценки остаточного срока службы детали.

В отличие от закона PARIS уравнение Forman-Mettu позволяет охватывать всю кривую развития трещины в функции соотношения  $R$ :

$$\frac{da}{dN} = C_{FM} \left[ \frac{1-\gamma}{1-R} \Delta K \right]^{n_{FM}} \times \left( \frac{1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}}{1 - \frac{K_{max}}{K_C}} \right)^q. \quad (7)$$

Параметры  $\Delta K_{th}$ ,  $K_C$ ,  $C_{FM}$ ,  $n_{FM}$ ,  $p$  и  $q$  — это величины, зависящие от свойств материала. В связи с этим при использовании их в уравнении (7) расчетные результаты должны соответствовать экспериментально полученным усредненным значениям  $da/dN$ .

Остаточный срок службы детали до разрушения определяют исходя из начальной глубины трещины  $a_A$  путем интегрирования уравнения ее развития (5). После некоторых преобразований этого уравнения получаем

$$dN = da/f(\Delta K, R). \quad (8)$$

Интегрирование полученного уравнения дает выражение для определения остаточного срока службы  $N_B$  до разрушения (критическая глубина трещины  $a_c$ ):

$$N_B = \int_{a_A}^{a_c} \frac{da}{f(\Delta K, R)}. \quad (9)$$

В общем случае интегрирование должно проводиться итеративно.

## Методы исследования и факторы, влияющие на процесс развития трещин в осях колесных пар

Для предварительного расчета процессов развития трещин в деталях и узлах, с одной стороны, существуют программы, основывающиеся на аналитических решениях для определенных видов трещин. С другой стороны, разработаны программы, позволяющие осуществлять цифровое моделирование процесса развития трещин. Для изучения параметров этих процессов в деталях с относительно простой геометрией наиболее эффективны программы Nasgro и Esacrack.

Программа Nasgro (таблица) изначально была представлена Национальной аэрокосмической ассоциацией США (NASA) и широко используется в этой отрасли. В последнее время она получает все

большее распространение и в других областях техники.

Главный модуль Nasfla дает возможность исследовать развитие трещин в деталях и узлах, испытывающих циклические нагрузки. Он включает в себя библиотеку геометрий и конфигураций трещин с соответствующими решениями для коэффициентов интенсивности напряжений. Основываясь на конфигурациях трещин, можно моделировать развитие усталостных трещин для постоянных и переменных амплитуд нагрузки.

Поскольку программа Nasgro хорошо зарекомендовала себя на практике, было решено применить ее также для исследований развития трещин в осях колесных пар.

Посредством вариативных вычислений можно показать, как влияют на развитие усталостных трещин следующие факторы:

- уровень коллектива нагрузок;
- сборочные (усредненные) напряжения;
- свойства материала, влияющие на механику разрушения;
- глубина и длина трещин, обнаруживаемых при дефектоскопии;
- последовательность нагружений.

Такое моделирование с точки зрения механики разрушения позволяет получить исходные данные для определения интервалов контрольных проверок.

При моделировании разрастания трещин в осях колесных пар поезда ICE применили модель трещины SC05, предлагаемую в программе Nasgro. Модель представляет собой пустотелую ось с трещиной полуэллиптической формы на наружной поверхности (рис. 3) глубиной  $a$  и длиной  $2c$ . Такая модель идеализирует реальную трещину, которая в оси колесной пары, как правило, возникает рядом с подступичной частью.

При использовании такой модели трещины действующие постоянные и изгибные напряжения

Основные модули программы Nasgro

Nasgro		
Nasfla	Исследования процесса развития трещин	Nasmat
	Расчет критической длины трещин	
	Расчет коэффициента интенсивности напряжений	

можно наложить друг на друга. Для расчета осей колесных пар принимают, что напряжения изгиба соответствуют коллективу амплитуд, возникающих в плоскости трещины. Их рассчитывают с использованием комплекса номинальных напряжений, полученного в рамках измерений, которые проводят в эксплуатационных условиях. Постоянные напряжения представляют собой нормальные напряжения растяжения, обычно возникающие рядом с подступичной частью при запрессовке колеса на ось. При расчетах про-

Параметры материала детали для ввода в уравнение процесса развития трещины (см. уравнение (7)) были взяты из имевшихся источников. С помощью программы Nasgro расчет производился для любой комбинации нагрузок при заданной геометрии трещины, а именно глубиной  $a$ , длиной  $2c$ . Эта форма трещины является началом следующего шага в ее развитии. Моделирование продолжается до тех пор, пока интенсивность напряжений  $K_{max}$  не достигнет значения  $K_c$ . Полученные значения позволяют построить

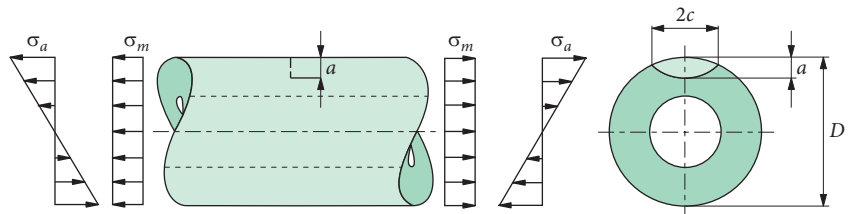


Рис. 3. Модель трещины SC05 в программе Nasgro

цесса дальнейшего развития трещины в качестве изменяемых величин принимают амплитудные либо усредненные напряжения. Можно также варьировать начальную геометрию трещины.

Коллектив нагрузок с измеренными амплитудными напряжениями  $\sigma_a$ , расчетными усредненными напряжениями  $\sigma_m$  и поверхностным напряжением  $\sigma_o$  показан на рис. 4 и представлен выражением

$$\sigma_o = \sigma_m + \sigma_a \quad (10)$$

При моделировании процесса развития трещины уровень коллектива нагрузок был снижен в 5000 раз. Это позволило многократно вводить этот параметр в ходе моделирования.

кривые, представляющие собой зависимость глубины трещины от числа циклов нагружения (пробега) при различных видах нагрузки. Влияние уровня коллектива нагрузок на развитие усталостных трещин в осях колесных пар поезда ICE показано на рис. 5.

Моделирование начиналось с исходной глубины трещины 2 мм и соотношения  $a_A/c$ , равного 0,882. Кривая 1 отражает зависимость глубины трещины от пробега для коллектива амплитуд, действовавшего в ходе испытательных поездок. Как следует из графика, трещина вначале растет очень медленно по мере увеличения пробега, а затем ее развитие скачкообразно ускоряется до полной нестабиль-

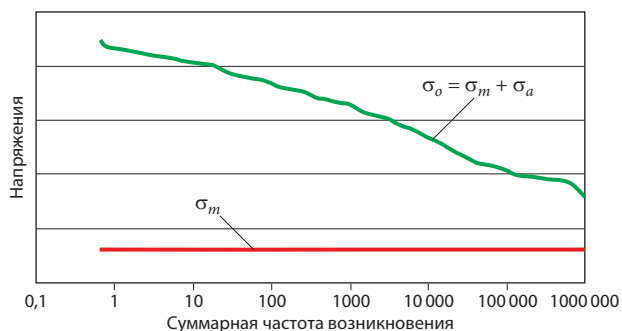


Рис. 4. Коллектив нагрузок для исследовавшихся осей колесных пар и частота возникновения нагрузок

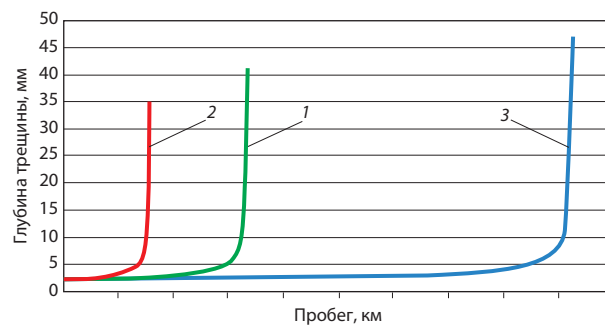


Рис. 5. Влияние уровня нагрузок на рост усталостных трещин осей в поезде ICE

ности. Увеличение уровня коллектива амплитуд на 10% вызывает сокращение допустимой длины пробега оси колесной пары вдвое (кривая 2), а уменьшение амплитуды на 10%, наоборот, увеличивает пробег втрое (кривая 3). В последнем случае заметное удлинение срока службы объясняется тем, что при уменьшении нагрузки большее число циклов нагружения не вызывает роста трещины, потому что циклический коэффициент интенсивности напряжений  $\Delta K$  находится в зоне ниже порогового значения  $\Delta K_{th}$ .

Влияние на остаточный срок службы оси запрессовочных напряжений, возникающих при формировании колесной пары, показано на рис. 6. Здесь также моделирование проводилось при начальной глубине трещины 2 мм и соотношении  $a_A/c$ , равном 0,882. Кривые показывают, что трещина так же, как и в предыдущем случае, вначале развивается медленно. Начиная с определенной глубины (примерно 5 мм) развитие трещины происхо-

дит с высокой скоростью и завершается разрушением оси. Наибольший пробег дает моделирование, отражающее только чистое воздействие коллектива амплитуд (кривая 1). При наложении на эти амплитуды положительных усредненных напряжений 20,5 МПа значительно сокращается остаточный срок службы детали (кривая 2). Если усредненные напряжения возрастают до 30,5 МПа, то остаточный срок службы еще сильнее сокращается (кривая 3).

Причина столь разных величин остаточного пробега заключается в зависимости коэффициента  $\Delta K_{th}$  (пороговое значение для развития усталостных трещин) от соотношения напряжений  $R$ . При возрастании усредненных напряжений значение  $R$  изменяется особенно интенсивно при циклических нагружениях от малой амплитуды, равной  $-1$ , до значительных величин. Это в свою очередь вызывает снижение коэффициента  $\Delta K_{th}$  для определенного цикла нагружений и

приводит к тому, что цикл нагружений с малым циклическим коэффициентом интенсивности напряжений становится причиной увеличения трещин.

Влияние начальной глубины трещины  $a_A$  на величину пробега оси колесной пары показано на рис. 7. Моделирование развития трещины проводилось для коллектива амплитуд с наложением среднего напряжения 30,5 МПа и при соотношении  $a_A/c = 0,882$ . Изменяя начальную глубину трещины, определяли влияние глубины трещины, обнаруженной при очередном дефектоскопировании, на остаточный срок службы осей колесных пар. В настоящее время при ультразвуковом исследовании минимальная, надежно определяемая глубина трещины равна 2 мм. Характер кривых показывает, что здесь также сначала идет медленное развитие трещины, а затем следует крутой подъем до достижения значения  $K_C$  (кривая 1). Увеличение начальной глубины трещины до  $a_A = 2,5$  мм при исследо-

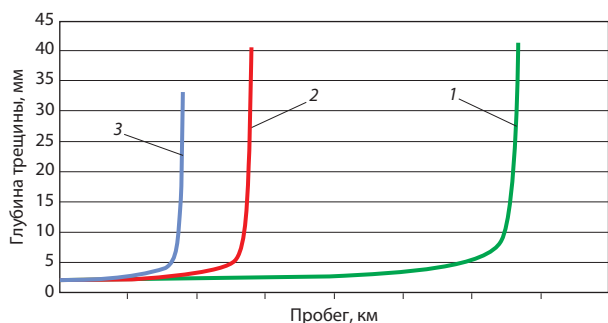


Рис. 6. Влияние сборочных (усредненных) напряжений на величину остаточного пробега колесной пары с трещинами в оси

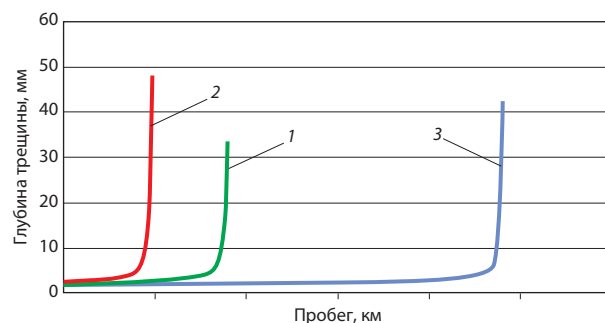


Рис. 7. Влияние начальной глубины трещины на пробег оси колесной пары



вавшихся условиях ведет к сокращению срока службы почти наполовину (кривая 2), в то время как уменьшение исходной глубины трещины до 1,5 мм увеличивает остаточный срок службы в 2,5 раза (кривая 3). Отсюда следует, что если бы удалось найти способ надежного обнаружения трещин начиная с глубины 1,5 мм, можно было бы в значительной мере увеличить интервал между очередными инспекциями.

В рамках моделирования было также исследовано влияние величины порогового значения  $\Delta K_{th}$  на рост усталостных трещин, а также проверен эффект влияния последовательности нагружений на остаточный срок службы осей колесных пар с трещинами. Изменения этого коэффициента показывают, что понижение  $\Delta K_{th}$  укорачивает срок

службы колесных пар, в то время как его увеличение повышает величину их рабочего пробега. Проводившиеся до сих пор исследования показали, что эффект последовательности изменения нагрузки сказывается на остаточном сроке службы незначительно.

#### Определение интервалов контрольных проверок

Исследования механики развития трещин позволяют получить исходные данные для определения интервалов проведения контрольных проверок. При этом следует учитывать, что моделирование увеличения трещин у осей колесных пар должно проводиться с учетом всех важных факторов, влияющих на процесс.

Как показывают результаты проведенных ранее этапов исследований, даже небольшие изменения параметров в значительной мере влияют на остаточный рабочий ресурс осей колесных пар.

Чтобы добиться высокой степени безопасности движения, наряду с моделированием процесса развития трещин с использованием компьютерной программы Nasgro рекомендуется также проводить расчеты на конечно-элементной модели по программе Adapcrack3D, а также экспериментальные исследования на реальных деталях, например подлинных осях колесных пар.

*По материалам университетов Падерборна ([www.uni-paderborn.de](http://www.uni-paderborn.de)) и Ростка ([www.stm.uni-rostock.de](http://www.stm.uni-rostock.de)); Eisenbahningenieur, 2010, № 2, S. 46–49.*

## Будущее приближается

В современном мире железнодорожная отрасль не может устойчиво развиваться без международных контактов, обмена опытом и знаниями, привлечения передовых технологий и технических решений со всего мира. На наших глазах происходят фундаментальные изменения на Российских железных дорогах — мы видим современные поезда, продолжаются структурные реформы, в железнодорожную промышленность приходят новые технологии, крупнейшие компании — изготовители железнодорожной техники уже осуществляют локализацию производства в России.

Обязательным условием для успешной модернизации отечественной железнодорожной отрасли является доступ к информации о новых проектах в России и за рубежом, событиях на рынках железнодорожной техники, научных исследованиях, о новых технологиях и опыте их внедрения на железных дорогах мира.

Именно такую цель — сделать эту информацию более доступной для отечественных специалистов — ставит перед собой журнал «Железные дороги мира».

**Подписной индекс** ежемесячного журнала «Железные дороги мира» — 70306 (для подписки на весь год — индекс 87096).

Информацию о подписке (в том числе в странах дальнего зарубежья) можно получить по телефону +7 (499) 317-55-65 или на сайте [www.zdmira.ru](http://www.zdmira.ru).



**ЖЕЛЕЗНЫЕ  
ДОРОГИ  
МИРА**

