

Рухомий склад

ЖИВУЧІСТЬ

УДК 629.463.5

Рейдемейстер А. Г., канд. техн. наук,
Костенко Ю. А. Сороколет А. В., інженери,
Дніпропетровський національний
університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
(Дніпропетровськ, Україна)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ (ЖИВУЧЕСТИ) ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОСИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ИЗГИБ

Ключевые слова: циклическая вязкость
разрушения, коэффициент интенсивности
напряжений, циклическое нагружение,
усталостная трещина, железнодорожные
оси.

Введение

Изучение усталостного разрушения металлов представляет большой интерес, как для конструкторов-машинистроителей, так и для испытателей новых машин и механизмов. При испытании новых деталей или узлов, изготовленных по новым технологиям или с использованием новых материалов, для испытателей предстает задача определить характеристики прочности и ресурса.

В большинстве случаев инициатором усталостных разрушений бывают технологические дефекты (непровары, неметаллические включения, волосовины, закалочные трещины, плохое качество обработки поверхности и т. п.), которые или сами по себе являются трещинами, или приводят к зарождению трещины после некоторого времени эксплуатации. В этом случае срок службы детали будет зависеть от склонности к развитию трещины, от дефектов, полученных при изготовлении или в процессе эксплуатации.

Постановка проблемы

К железнодорожным осям предъявляются высокие требования по надежности и долговечности, т. е. от них зависит безопасность движения. В процессе эксплуатации оси приобретают различные

дефекты, наиболее опасными из которых являются усталостные трещины. Трещины являются концентраторы напряжений, которые, развиваясь, приводят к усталостному разрушению.

Исследованиями установлено, что процесс развития трещины может быть весьма длительным и зависит от скорости ее роста [1]. Количественным показателем сопротивления развитию усталостной трещины является циклическая вязкость разрушения K_{IC} [2] (критический коэффициент интенсивности напряжений).

Определение K_{IC} для испытуемого материала является сложной задачей, т. к. при различных условиях проведения испытаний можно получить отличные результаты.

Обзор исследований и публикаций

Наиболее известные в специализированной литературе методы исследования трещиностойкости металлов принадлежат В. Т. Трошенко [2]. В монографии изложен комплекс вопросов, связанных с зарождением и развитием усталостных трещин, а также влияние на эти процессы различных условий.

В справочниках [8] под ред. Ю. Мураками коллективом японских специалистов подготовлены материалы по различным классам задач о трещинах – в пластинах, оболочках, массивных элементах, сварных швах, кусочно-однородных телах.

Практические изучения развития трещин на лабораторных образцах описывали в публикациях В. Т. Трошенко [14], Л. О. Вакуленко [10–13].

В данной публикации описано исследование трещиностойкости для массивных деталей определенного размера, формы и механической обработки.

Коэффициент напряжений (КИП) интенсивности

Процесс зарождения трещины сопровождается образованием пластических микродеформаций на поверхности детали, которые со временем работы под воздействием циклической нагрузки приводят к зарождению микротрещин, последние

перерастают в трещины и приводят к разрушению детали. Скорость роста уже образовавшейся трещины зависит от многих факторов (механических свойств материала, термообработки, характера цикла нагружения и проч.).

Многочисленными исследованиями установлено, что распространение трещины от ее появления до полного разрушения детали проходит три характерных этапа [3], различающиеся скоростью ее роста. Первый этап (рис. 1) характеризуется небольшой скоростью, т. к. трещина еще мала, а ее продвижение происходит преимущественно вдоль полос скольжения (дефекты поверхности в виде темных полосок и разветвленных линий на поверхности детали, образовавшихся вследствие местных напряжений, превышающих предел текучести металла [4]). Основную часть составляет второй этап, когда трещина растет с примерно постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном наибольшему нормальному напряжению. На третьем этапе, когда трещина имеет уже достаточно большие размеры, скорость ее роста быстро увеличивается, и происходит практически мгновенное хрупкое разрушение. Такое разделение на этапы носит условный характер, но, тем не менее, позволяет изучать каждую стадию в отдельности, поскольку рост усталостной трещины на каждом этапе подчиняется разным закономерностям.

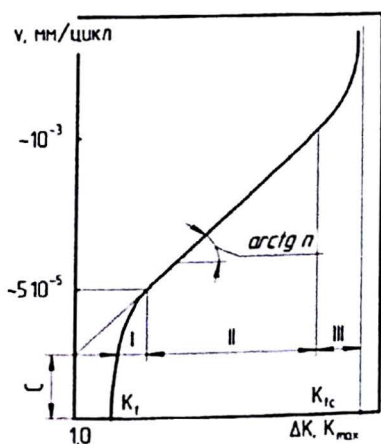


Рис. 1 – Диаграмма роста усталостных трещин.

Согласно первой теории хрупкого разрушения, разработанной Гриффитсом [5], в

качестве критерия, характеризующего поле напряжения у вершины трещины, используется коэффициент интенсивности напряжения (КИН):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi b}, [\text{МПа}\sqrt{\text{м}}] \quad (1)$$

где σ – напряжение в сечении трещины (без учета ослабления);

b – длина трещины.

КИН определяет условия роста трещины: нестабильный рост при статической нагрузке наступает, когда K_I достигает значения K_{IC} , называемого критическим коэффициентом интенсивности напряжения или вязкостью разрушения.

При циклическом нагружении трещина может подрастать в каждом цикле нагружения при значениях $K_I \ll K_C$, и после достаточно большого числа циклов N наступает окончательное разрушение.

При циклическом нагружении в вершине трещины будут возникать максимальные $\sigma_{\max}$ и минимальные $\sigma_{\min}$ напряжения цикла, которым соответствуют коэффициенты $K_{I\max}$ и $K_{I\min}$. Наиболее широко в качестве характеристики цикла используют размах КИН:

$$\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min}. \quad (2)$$

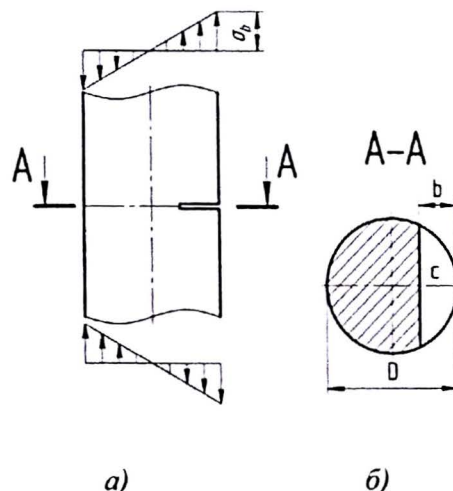


Рис. 2 – Схема трещины в длинном цилиндрическом изгибаемом стержне.

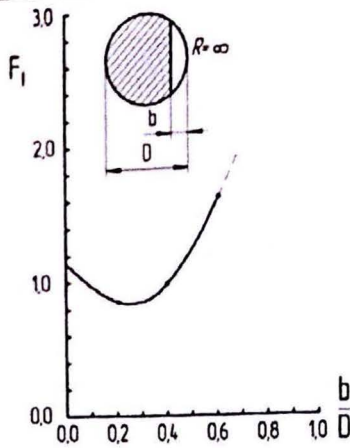


Рис. 3 – Поправочный коэффициент для круглого поперечного сечения с надрезом.

Обзор существующих методов определения циклической вязкости разрушения (живучести) железнодорожных осей

Циклическая вязкость разрушения (живучесть) вагонных чистовых осей, изготовленных из стали ОС [6] с пределом прочности $\sigma_B = 580 \dots 650$ МПа и ударной вязкостью КСУ при $+20^\circ\text{C}$ $34 \dots 49$ Дж/см², должна составлять $K_{fc} \geq 60$ МПа $\sqrt{\text{м}}$ [7] и определяется экспериментально.

Оси испытывают на чистый изгиб при нагружении по схеме балки на двух опорах с приложением нагрузки к подступичной части оси (рис. 4).

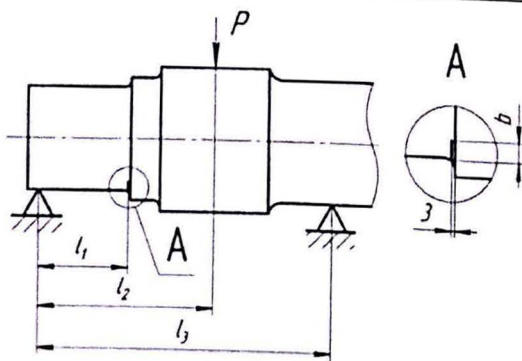


Рис. 4 – Схема нагружения оси и надрез.

Коэффициент вязкости разрушения железнодорожной оси отличается от K_{fc} для материала лабораторных образцов в силу влияния фактора масштабности и наличия упрочнения стали оси, поэтому проводят натурные испытания на образцах чистовых железнодорожных осей. При определении K_{fc} создают условия для зарождения и роста

усталостной трещины до разрушения испытуемого образца.

Для сокращения времени испытаний, чтоб ускорить момент зарождения трещины, в шейке оси на расстоянии 3 мм от торца предподступичной части делают надрез (см. рис. 4 вид А), от которого должна образоваться трещина. Форма надреза: ширина $1 \dots 1,5$ мм и вершина заострена под углом 30° , глубина – $13 \dots 19$ мм.

Значение показателя циклической вязкости разрушения K_{fc} , т. е. критического КИН при котором происходит разрушение образца для случая поверхностной трещины в длинном цилиндрическом изгибаемом стержне (рис. 2) определяется формулой [8]:

$$K_{fc} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi \cdot b_{кр}} \cdot F_1 \left(\frac{b_{кр}}{D} \right), \quad (3)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение цикла переменного нагружения в исследованном сечении брутто А-А (без учета ослабления от концентраторов напряжения);

$b_{кр}$ – значения глубины усталостной трещины, при которой произошло разрушение образца;

$F_1 \left(\frac{b_{кр}}{D} \right)$ – поправочный коэффициент, функция, зависящая от отношения критической длины трещины $b_{кр}$ и диаметра образца D .

Цели исследований

Целями исследований были изучение параметра, который характеризует сопротивление развитию усталостной трещины, изучение метода определения K_{fc} и само определение коэффициента вязкости разрушения железнодорожной оси K_{fc} для образцов одной конкретной партии, изготовленных из стали одной плавки.

Проведение испытаний

Для проведения испытания достаточно половинки оси, поэтому чистовые оси разрезают посередине. Полученные части оси (образцы) подготавливают к проведению

испытаний по определению циклической вязкости разрушения, выполняя надрез с острой вершиной. Далее с образцами проводят испытания на стенде, предназначенном для циклических испытаний металлоконструкций и оборудованном пульсатором, который создает циклическую нагрузку с коэффициентом асимметрии цикла 0,1 и максимальным усилием цикла, обеспечивающим создание напряжений в месте расположения трещины, близких к пределу выносливости материала оси. Стенд также должен быть оборудован силовыми измерителями, поддерживающими заданные нагрузки в процессе испытаний в автоматическом режиме, и счетчиком циклов. Подробное описание эксперимента приведено в [9]. Длину трещины на поверхности оси регулярно измеряют.

Результаты

Графически зависимость длины трещины L и номинальных наибольших напряжений цикла от числа циклов приведены на рис. 5...7 (был проведен эксперимент на трех образцах, изготовленных из двух осей одной плавки).

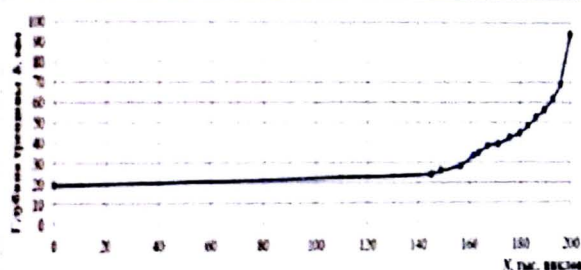


Рис. 5 – Рост трещины на образце №1. Начальная глубина трещиноподобного дефекта (надреза) 19 мм. Максимальные напряжения цикла в зоне шейки оси в брутто сечении – 220 МПа.

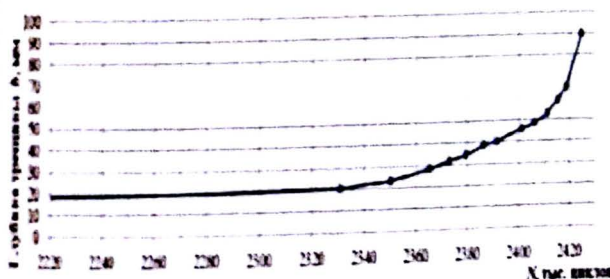


Рис. 6 – Рост трещины на образце №2. Начальная глубина трещиноподобного дефекта (надреза) 13 мм. Максимальные напряжения цикла в зоне шейки оси в брутто сечении 140 МПа – до 1500 тыс. циклов, 160 МПа – до 1900 тыс. циклов, 205 МПа – до 2050 тыс. циклов, 220 МПа – с 2050 тыс. циклов до разрушения.

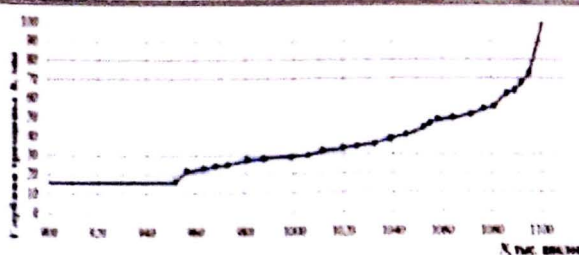


Рис. 7 – Рост трещины на образце №3. Начальная глубина трещиноподобного дефекта (надреза) 13 мм. Максимальные напряжения цикла в зоне шейки оси в брутто сечении – 170 МПа.

Фотографии сечений оси после излома приведены на рис. 8...10. Хорошо видны следующие зоны [1]:

- 1) зона стабильного развития трещины, характеризующаяся наличием микрополос, ориентированных нормально по отношению к направлению роста трещины;
- 2) зона ускоренного усталостного развития трещины, характеризующаяся смешанным микрорельефом (микрополосы и ямки);
- 3) зона излома.



Рис. 8 – Излом фрагмента оси №1 после испытаний.



Рис. 9 – Излом фрагмента оси №2 после испытаний.



Рис. 10 – Излом фрагмента оси №3 после испытаний.

Надрез вместе с первой и второй областями занимает 60...70 % поперечного сечения. Усталостные линии от надреза распространяются сначала круговыми фронтами, которые затем выпрямляются так,

что границы всех областей параллельны линии надреза.

По формуле (3), используя справочные данные [3] было получено для образцов №1 и №2 $K_k = 206 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а для образца №3 $K_k = 200 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Выводы

1. Коэффициент вязкости разрушения характеризует поле напряжений у вершины трещины. Может определяться для статического разрушения металла и для циклического.

2. В практической части исследований были проведены испытания трех осей для железнодорожного подвижного состава с целью определения циклической вязкости разрушения, которая составила $K_k = 206 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ для образцов 1 и 2 и $K_k = 200 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ для образца 3. Разница в значениях не превышает 3 %, что свидетельствует о стабильных свойствах образцов и нечувствительности к условиям проведения эксперимента: глубине начального надреза, рабочим напряжениям цикла.

3. При коэффициенте интенсивности напряжений $K < 200 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ скорость развития трещины не превышает 3 0-5 мм/цикл, при больших значениях коэффициента интенсивности напряжений скорость значительно увеличилась и составляла (35...60) 510 мм/цикл.

Литература

1. Иванова В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Тереньтев. – М. Металлургия, 1975. – 455 с.
2. Трошенко В. Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В. Т. Трошенко, В. В. Покровский, А. В. Прокопенко. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.
3. Кудрявцев П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины / П. И. Кудрявцев. – М. Машиностроение, 1982. – 171 с.
4. ГОСТ 21014-88. Прокат черных металлов термины и определения дефектов поверхности. – Введ. 1990-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 62 с.

5. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов / В. С. Золотаревский. – Металлургия, 1983. – 352 с.

6. ГОСТ 4728-2010 Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия

7. НБ ЖТ ТМ 02-98. Нормы безопасности на железнодорожном транспорте. Металлопродукция для железнодорожного подвижного состава. Нормы безопасности (приняты и введены в действие указанием МПС России от 24.07.1998 N Г-896у) (ред. от 21.08.2012).

8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 2: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с.

9. СТ ССФЖТ ТМ 153-2003 Оси чистовые вагонные. Определение циклической вязкости разрушения. Типовая методика испытаний.

10. Вакуленко І. О. Про взаємозв'язок структурних перетворень при втомі вуглецевої сталі з особливостями будови поверхонь руйнування / І. О. Вакуленко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 32. Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010.

11. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І. О. Вакуленко. – Д. : Маковецький, 2012. – 152 с.

12. Вакуленко, І. О. Вплив дисперсності структурних складових вуглецевої сталі на опір руйнуванню / І. О.Вакуленко, М. А. Грищенко, О. М. Перков // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 237-239.

13. Вакуленко, І. О. Оцінка коефіцієнта інтенсивності напружень для умов неконтрольованого зростання тріщини / І. О. Вакуленко, М. М. Грищенко, О. М. Перков // Сб. науч. тр. «Строительство, материаловедение, машиностроение». – 2007. – Вип. 41. – Ч. 2. – С. 58–61.

14. Трошенко В. Т. Пороговые коэффициенты интенсивности напряжений и пределы выносливости металлов / В. Т. Трошенко // Проблемы прочности. – 2000, № 5.