



## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СРОКА СЛУЖБЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*В. Л. Горобец, д.т.н., главн.н.с., С.В Мямлин, д.т.н., проф., О.Л.Янгулова, к.т.н., доц.,  
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика  
В. Лазаряна (Украина), Е.В. Горобец, маг., Державне підприємство "Дніпропетровський орган з  
сертифікації залізничного транспорту".*

*У статті запропоновані сучасні методи оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій  
рухомого складу залізниць, а також принципи побудови регламентів експлуатації рухомого  
складу за межами призначеного терміну служби.*

Проведение многочисленных научно-исследовательских работ [1-10], связанных с оценкой остаточного ресурса несущих конструкций подвижного состава железных дорог Украины привело к необходимости более детального исследования динамики развития усталостных процессов в конструкционных материалах при действии длительных эксплуатационных нагрузок.

Экспериментальные кривые выносливости обычно строят по испытаниям ансамблей (выборок) образцов как функции величин разрушающих напряжений  $\sigma_p$  в зависимости от количеств циклов  $N$ , выдерживаемых образцами (детальми) до появления трещины или до разрушения в виде

$$\sigma_p = f(N) \quad (1)$$

Положив [11], что нагруженность конструкции можно охарактеризовать некоторой интенсивностью  $\lambda$  влияющих на выносливость факторов и временем  $T$  их действия, уравнение (1) представим как

$$\sigma_p = f(\lambda T) \quad (2)$$

Принимая, подобно [12] пропорциональную зависимость между долговечностью в циклах, интенсивностью и временем воздействия нагрузок, а именно  $N = \lambda T$ , уравнение (2) можно записать в форме

$$\sigma_p = f(\lambda T) \quad (3)$$

Следовательно, если существуют конечные временные интервалы, в течение которых величина  $\lambda$  постоянна или слабо изменчива, функциональная зависимость (1) применима и для описания усталостных явлений во временной области. Отметим, что лабораторные испытания образцов или конструкций для установления зависимостей типа (1) также проводятся в области времени и характеризуются своими, испытательными интенсивностями нагрузок.

Учет динамики снижения предела выносливости очень важен при решении задач оценки ресурса материалов и конструкций. Модель, исследованная в работе [13], построена на основании гипотезы Генри о накоплении повреждений, а также гиперболической аппроксимации кривой выносливости (1). Она положена в основу расчета ресурса несущих конструкций тягового подвижного состава РФ [14]. В работе [15] предложена общая модель накопления меры повреждения, основанная на некоторой дифференциальной зависимости, с помощью которой оценивается ресурс конструкций. В монографии [16] рассмотрено несколько вариантов подобных моделей с различными видами указанной зависимости. В работе С.В. Серенсена [17] приведена экспериментальная зависимость предела выносливости от меры повреждения в виде

$$\sigma_{-1\text{повр}} = \sigma_{-10} \cdot \left[ 1 - \frac{n(\sigma)}{N(\sigma)} \cdot K \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_{-10}} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

здесь  $\sigma_{-1\text{повр}}$  – предел выносливости поврежденной конструкции;  $\sigma_{-10}$  – начальное значение предела выносливости;  $n(\sigma)$  – количество циклов разрушающих напряжений с амплитудой  $\sigma$ , приложенных к конструкции;  $N(\sigma)$  – количество циклов до разрушения при действии на образец напряжений с амплитудой  $\sigma$ ;  $K$  – эмпирическая константа, которая составляла  $K=1,33$  для малоуглеродистых сталей,  $K=1,5$  – для среднеуглеродистых и  $K=1,8$  для легированных сталей.

В железнодорожной нормативной документации РФ [17] при расчете ограниченного срока службы несущих конструкций вагонов учитывается влияние их наработки  $D$ . Последняя определяется как  $D = Bf \sum \sigma_i^m p_i$ , где  $B$  – суммарное время действия напряжений с амплитудой  $\sigma_i$ , которые возникают с вероятностью  $p_i$  и изменяются с эффективной частотой  $f$ .

В соответствии с [17] для описания кривой выносливости (1) примем наиболее широко распространенную и экспериментально подтвержденную для широкого круга конструкционных материалов степенную зависимость

$$C = \sigma^m N = \text{const}, \quad (5)$$

где  $C$  – мера наработки образца, либо детали до разрушения;  $\sigma$  – амплитуда разрушающего напряжения;  $m$  – показатель степени кривой выносливости;  $N$  – количество циклов до разрушения.

Зависимость (5) в области многоциклового усталости используется, в основном в виде модификаций [16,19], отраженных на рис. 1. На рисунке приняты следующие обозначения:  $\sigma_T, N_T$  – соответственно, напряжения и количества циклов, характеризующие точку перехода процесса разрушения в малоцикловую область;  $N_0$  – количество циклов нагружения конструкции, соответствующее точкам перегиба кривых выносливости;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости.

Из приведенных модификаций только третья содержит в явном виде предел выносливости  $\sigma_{-1}$ . Её расчетные соотношения [16] запишем в виде

$$N = \begin{cases} N_0 (\sigma_{-1}/\sigma)^m & \text{при } \sigma_T > \sigma \geq \sigma_{-1}; \\ \infty & \text{при } \sigma < \sigma_{-1} \end{cases} \quad (6)$$

На основании данного предположения можно составить дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения предела выносливости материала или конструкции при действии циклических нагрузок:

$$\sigma_{-1}^{m-1} \cdot \frac{d(\sigma_{-1})}{dt} + \frac{\lambda}{m \cdot N_0} \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma_i^m f(\sigma) d\sigma = 0. \quad (7)$$

Решение интегродифференциального уравнения (7) определяет функцию изменения во времени предела выносливости образца либо конструкции. Его начальным условием является исходная (для новой конструкции, либо на момент контроля при оценке остаточного ресурса) величина предела выносливости  $\sigma_{-1}|_{t=0} = \sigma_{-10}$ .

Особенностью выражения (7) является точный учет разрушающих напряжений. Это позволяет получить точные значения среднего ресурса несущих конструкций подвижного состава.

Считается, что при многоциклового усталости период роста трещины от её появления до потери несущей способности гораздо ниже, чем время до её зарождения. Однако, при эксплуатации несущих конструкций за пределами назначенного срока службы необходимо иметь методологию, позволяющую оценивать не только выносливость, но и живучесть несущих конструкций, с целью установления обоснованных периодов контроля их технического состояния.

Рассмотрим методы оценки живучести несущих конструкций на примере рам тележек электропоездов ЭР1 и ЭР2.

При проведении стендовых вибрационных испытаний рам тележек электропоездов ЭР1 и ЭР2, они были доведены до потери несущей способности. Таким образом, результаты испытаний содержат информацию как относительно выносливости их конструкций, так и относительно их сопротивления разрушению.

В зависимости от расположения датчика деформаций, в процессе роста трещины напряжения может увеличиваться (рис. 1а), когда датчик находится на пути роста трещины, уменьшаться (рис. 1б), когда трещина проходит мимо него и разгружает часть конструкции, или оставаться нечувствительным к росту трещины (рис. 1в). В любом случае, изменение величины напряжения при одинаковой силе возбуждения может свидетельствовать о наличии роста трещины.

При одинаковой силе возбуждения время роста трещины может быть оценено как

$$\tau_{i\min} = \min \left( \frac{N_{ii}}{N_c} T_c \right) \quad (8)$$

где  $\tau_i$  - время роста трещины;  $N_{ii}$  - количество циклов нагрузки, при котором происходит изменение уровня  $i$ -того датчика деформаций;  $N_c$  - общее количество циклов нагрузки к потере рамой тележки несущей способности;  $T_c$  - расчетное время эксплуатации при  $N_c$  циклах нагрузки конструкции.

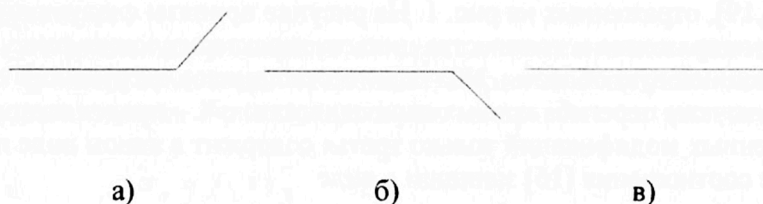


Рисунок 1 Возможное поведение напряжения в элементах конструкции в процессе испытаний при разной локализации датчика деформаций относительно трещины

Приведенные выше соображения могут быть использованы для назначения научно обоснованных сроков проведения диагностики несущих конструкций подвижного состава при его эксплуатации за пределами назначенного срока службы.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Горобец В. Л. Оценка остаточного ресурса рам тележек электропоездов ЭР1, ЭР2 путем их р. таль вибрационных испытаний [Текст]/ В.Л. Горобец, В. П. Кулешов, А. И. Паламаренко // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава: Сб. научн. Тр. ДИИТа. – Днепропетровск: «Наука и образование», 1998. – С. 56-62.
2. Горобец В. Л. Продление срока службы подвижного состава Украины [Текст]/ В. Л. Горобец, Е. П. Блохин // Вестник Восточноукраинского р. таль ого университета им. В. Даля. - №9 (67). – 2003. – С 180-185.
3. Горобец В. Л. Динамічні ходові та динамічні міцносні випробування електровоза ВЛ40у [Текст] / В. Л. Горобець, О. М. Бондарєв, М. І Сергієнко та р.. // Зал. Транспорт України. – 2006 - №1. – С. 55–60.
4. Дослідження з оцінки залишкового ресурсу та можливостей продовження строку служби основних несучих конструкцій електропоїздів ЕР9Е, ЕР9М [Текст]: Звіт з НДР (заключний). – № ДР 0106U006495. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2006. – 90 с.



5. Дослідження залишкової втомної міцності несучих конструкцій тепловозів М62, 2М62 та розробка заходів по підвищенню строку їх експлуатації: Звіт з НДР (заключний
6. Комплексная оценка срока службы пассажирских вагонов после проведения капитально-восстановительного ремонта: В 2 ч. [Текст]/ Е. П. Блохин, О. М. Савчук, Г. В. Рейдемейстер, В. Л. Горобец, и др. // Зал. Транспорт України, 2002 - №6. – С.24–29. – Ч. 1.
7. Комплексная оценка срока службы пассажирских вагонов после проведения капитально-восстановительного ремонта: В 2ч. [Текст]/ Е. П. Блохин, О. М. Савчук, Г. В. Рейдемейстер, В. Л. Горобец, и др. // Зал. Транспорт України, 2003. - № 3. – С.23–26. – Ч. 2.
8. Показники динаміки електровоза ЧС4 та міцності конструкцій рам візків виробництва ХК „Луганськтепловоз” [Текст]/ О. М. Бондарев, І.Е. Батюшин, В. Л. Горобець. та інші. // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. Академика В. Лазаряна, – Вып. 19, – Днепропетровск, 2007. – С. 152-160.
9. Продление срока службы тягового подвижного состава – один из способов обеспечения его надежной эксплуатации [Текст]/ Е.П. Блохин, В.Л. Горобец, А.Д. Лашко и др. // Транспорт: Зб. Наук. рр. ДІТу, Випуск 6. –Дніпропетровськ: Арт – Прес, 2000. – С. 14–20.
10. Экспериментальная оценка динамических качеств тепловозов ТГМ 6А в условиях их эксплуатации на путях промтранспорта [Текст]/ А.М Бондарев, В.Л. Горобец, И.М. Грушак и др. //Збірник наук. Праць Київського університету економіки і технологій транспорту: Серія „Транспортні системи і технології” – Вип.. 4. – К: КУЕТТ, 2003. – С. 13–21.
11. Горобец В. Л. Принцип эргодичности в модели выносливости материалов и конструкций // Зал. транспорт України, 2003. – №4. – С.32 – 35.
12. Горобец В.Л. Оценка показателей сопротивления усталости несущих конструкций тягового подвижного состава по данным его эксплуатации [Текст]. –Транспорт: Зб. наук. праць. – Вип. 9. – Дніпропетровськ, 2001. с. 60 – 66.
13. О модели сопротивления усталости несущих конструкций тягового подвижного состава для оценки их остаточного ресурса [Текст]/ Блохин Е.П., Горобец В.Л., Кулешов В.П., Саввин Ю.И. // Вестник Восточно-украинского государственного университета, 2002. - №2. -С. 276-289.
14. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. -М: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1998. -145 с.
15. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст]. – М:Машиностроение, 1984. –400 с.
16. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках [Текст]. –М:Машиностроение, 1989. –243 с.
17. Серенсен С.В. Об оценке долговечности при изменяющейся амплитуде переменных напряжений [Текст]. – Вест. машиностроения, 1944. -№ 7-8. С. 1-7.
18. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). –М: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.
19. Трошенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник в 2-х частях, Ч. 1. –Киев: Наук. думка, 1987. –505 с.