

В.Л. ГОРОБЕЦ<sup>1</sup>, О.М. БОНДАРЕВ<sup>2\*</sup>, В.М. СКОБЛЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, дом 2, ул. Лазаряна, Днепропетровск, Украина; 49010, тел./факс +380567931908, ел. почта [onildpps@gmail.com](mailto:onildpps@gmail.com)

<sup>2\*</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, бы.2, ул. Лазаряна, Днепропетровск, Украина; 49010, тел./факс +380567931908, ел. почта [bondam286@gmail.com](mailto:bondam286@gmail.com)

<sup>3</sup> Государственная администрация железнодорожного транспорта Украины, ул. Тверська буд. 5 Киев, Украина; 150 Державна адміністрація залізничного транспорту України, вул. Тверська буд. 5 Київ, Україна; 150 тел./факс 0444651351, ел. почта [ZRPZR@ukr.net](mailto:ZRPZR@ukr.net)

## О РАЗРАБОТКЕ МЕР ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ЭР1, ЭР2 ЗА ПРЕДЕЛАМИ УСТАНОВЛЕННОГО СРОКА СЛУЖБЫ

**Цель:** Целью работы является научное обоснование разработки технического регламента мер и условий эксплуатации электропоездов серий ЭР1, ЭР2 за пределами продленного срока эксплуатации.

**Методика:** Для достижения поставленной цели – научного обоснования разработки технического регламента мер эксплуатации электропоездов серий ЭР1, ЭР2 за пределами продленного срока эксплуатации (свыше 50 лет) было: проведен анализ научных публикаций по вопросам живучести основных элементов несущих конструкций, которые нагружаются динамическими знакопеременными нагрузками; проведен анализ результатов стендовых вибрационных испытаний рам тележек электропоездов ЭР1, ЭР2; разработаны технические решения с соответствующими мерами при выполнении которых становится возможным продолжить срок эксплуатации несущих конструкций электропоездов ЭР1 и ЭР2 свыше 50 лет.

**Результаты:** На основании комплекса проведенных экспериментальных и теоретических численных исследований получены результаты, которые способствовали разработке методики оценки срока развития трещин в наиболее напряженных точках несущих конструкций рам тележек и кузовов электропоездов ЭР1, ЭР2 с достижением опасных размеров, а также технического регламента мер, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию за пределами 50 лет.

**Научная новизна:** Для обеспечения безопасной эксплуатации электропоездов серий ЭР1, ЭР2 разработана методика оценки срока развития трещин в наиболее напряженных точках несущих конструкций рам тележек и кузовов с достижением опасных размеров, а также технический регламент мер, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию за пределами 50 лет.

**Практическая значимость:** Разработан технический регламент мер, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию кузовов электропоездов серий ЭР1, ЭР2 за пределами 50 лет.

*Ключевые слова:* тележки, кузов, расчетные модели, экспериментальные исследования, теоретические расчеты, электропоезда ЭР1, ЭР2, показатели прочности.

**Введение:** На основании проведенных ранее исследований по оценке показателей усталостной прочности и ресурса несущих конструкций (НК) рам тележек и кузовов электропоездов серий ЭР1 и ЭР2 [1-3,5-7] срок их эксплуатации был продлен до 50 лет. В данный момент на некоторых направлениях железных дорог Украины эксплуатируются электропоезда указанных серий со сроком, достигающим 50 лет. В связи с этим возник вопрос о выявлении возможностей безопасной эксплуатации отдельных элементов несущих конструкций рам тележек и кузовов таких электропоез-

дов. Для получения ответа на такой вопрос был проведен анализ причин разрушений несущих конструкций подвижного состава, который эксплуатируется на железных дорогах Украины за пределами назначенного срока [2].

На рис. 1-3 приведены виды элементов несущих конструкций, в которых при проведении вибрационных испытаний, а также в процессе эксплуатации образовались трещины [7].



Рис.1. Трещина на поперечной балке рамы тележки электропоезда ЭР9М



Рис. 2. Трещина в продольной балке рамы тележки, возникшая при проведении вибрационных ресурсных испытаний.



Рис. 3. Трещина в зоне шкворневого узла балки рамы моторной тележки электропоезда ЭР1.

Результаты проведенного анализа показали, что основными причинами разрушений можно считать:

1. Наличие посторонних включений в основной металл конструкции или сварного шва, а также некачественное выполнение сварных работ;
2. Неудачное конструктивное исполнение несущих конструкций подвижного состава;
3. Возникновение разрушений на месте выполненных работ по усилению или восстановлению показателей прочности НК;
4. Некорректное технологическое вмешательство в конструкцию подвижного состава;

5. Действие на несущие конструкции подвижного состава агрессивной среды и сезонных изменений температуры.

**Цель:** Цель указанной работы состоит в научном обосновании разработки технического регламента мер и условий эксплуатации электропоездов серий ЭР1, ЭР2 за пределами предельно продленного срока эксплуатации.

**Методика:** Для достижения поставленной цели – научного обоснования разработки технического регламента мер эксплуатации электропоездов серий ЭР1, ЭР2 за пределами продленного срока эксплуатации (свыше 50 лет) было: проведен анализ научных публикаций посвященных вопросам живучести основных элементов несущих конструкций, нагружаемых динамическими знакопеременными нагрузками [2,8-10]; проведен анализ результатов стендовых вибрационных испытаний рам тележек электропоездов ЭР1, ЭР2 [2,3,5-7]; разработаны технические решения мер позволяющих продолжить эксплуатацию несущих конструкций электропоездов ЭР1 и ЭР2 свыше 50 лет.

Таким образом для обеспечения безопасной эксплуатации электропоездов серий ЭР1 и ЭР2 свыше 50 лет необходимо разработать методику расчетов срока эксплуатации на протяжении которого в наиболее напряженных точках несущих конструкций рам тележек и кузовов возможно образование трещин и их развитие до опасных размеров. Такая методика даст возможность установить периодичность осмотров несущих конструкций рам тележек и кузовов указанных единиц подвижного состава и своевременно принимать меры, которые будут содействовать безопасной их эксплуатации.

### Результаты.

#### Расчетные соотношения для оценки трещиностойкости рам тележек электропоездов ЭР1, ЭР2

В процессе проведения стендовых вибрационных испытаний рамы тележек электропоездов ЭР1 и ЭР2 были доведены до потери несущей способности. Результаты этих испытаний содержат информацию как относительно выносливости их конструкций, так и относительно их сопротивления разрушению.

В зависимости от расположения датчика деформаций, в процессе роста трещины напряжение может увеличиваться (рис.4а), когда датчик находится на пути роста трещины, уменьшаться (рис.4б), когда трещина проходит мимо него и разгружает часть кон-

струкции, или оставаться нечувствительным к росту трещины (рис.4в). В произвольном случае изменение величины напряжения при одинаковой силе возбуждения может свидетельствовать о наличии трещины, которая при этом возрастает.

При одинаковой силе возбуждения время роста трещины может быть оценено как

$$\tau_{z \min} = \min \left( \frac{N_{zi}}{N_c} T_c \right) \quad (1)$$

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



а) б) в)

Рис. 4 Возможное поведение напряжения в элементах конструкции в процессе испытаний при разной локализации датчика деформаций относительно трещины.

Для рам тележек, в соответствии с вышеизложенным, проведена оценка времени разрушения конструкции. При этом предполагалось, что в каждом случае испытаний они прекращались при резком изменении реакции конструкции на нагрузку, то есть при потере ею несущей способности. Результаты расчетов (в нормальных климатических условиях) сведены в табл. 1.

Таблица 1 Оценка срока сопротивления разрушению рам тележек электропоездов ЭР1, ЭР2.

№ п/п	№ рамы тележки	$N_{zi}$	$N_c$	$T_c$ , лет	$\tau_z$ , лет
1	2	3	4	5	6
1	385	51034	524309	15	1,46
2	427	198450	1393951	15	2,14

3	40	-	1004400	15	-
4	170	180000	580000	15	4,66
5	397	251200	1455440	15	2,59

Отдельно необходимо рассмотреть два фактора, которые оказывают влияние на скорость роста трещины:

- асимметрия цикла нагрузки;
- температура среды.

При проведении испытаний нагрузка поддерживалась подобной режиму эксплуатации конструкции при штатной нагрузке.

Оценка влияния температуры окружающего среды по данным предыдущих исследований [7] показала, что в зимний период (при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$ ) трещина может развиться до критического уровня приблизительно за 4,5 месяца.

Таким образом проведенная оценка сопротивления разрушению рам тележек электропоездов ЭР1 и ЭР2 позволяет сделать следующие выводы:

1. Гипотетически, в зимний период трещина может развиться до критического уровня приблизительно за 4-4,5 месяца.

2. Обследование состояния несущих конструкции рам тележек целесообразно проводить два раза на протяжении года: первый вспомогательный – на протяжении месяца второй половины октября; второй основной – на протяжении месяца второй половины марта.

3. Для кузовов электропоездов сохранять регламент обследований таким, как и для рам тележек.

### Разработка технического регламента и технических решений по продлению срока эксплуатации основных несущих конструкций.

Для обеспечения безопасной эксплуатации указанных единиц подвижного состава рекомендуются соответствующие меры, которые должны выполняться во время проведения ремонтных работ. Содержание этих мер, на основании вышеизложенных результатов и выводов, было обобщено в виде разработанного технического регламента эксплуатации несущих конструкций.

Данный регламент базируется на следующих положениях:

1. Эксплуатация электропоездов ЭР1, ЭР2 в период после истощения научно обоснованных установленных сроков, продляется

индивидуально для каждого вагона электропоезда согласно их фактическому состоянию.

2. Регламент работ по поддержке состояния несущих конструкций (рам тележек, рамы кузова), обеспечивающих безопасные условия эксплуатации электропоездов, создается на основе методов поэтапного продления срока их службы.

3. Периодичность, сезонность и объемы обследований определяются на основании результатов стендовых вибрационных испытаний рам тележек.

### **Определение периодичности, сезонности и объемов обследований несущих конструкций электропоездов ЭР1 и ЭР2**

Для сопоставления особенностей сопротивления развитию трещин условно примем, что в зимний период, по сравнению с другими временами года, трещина развивается в четыре раза быстрее (принимается жесткий режим, при котором температура в зимний период  $-30^{\circ}\text{C}$  поддерживается на протяжении трех зимних месяцев).

При изменении среднемесячных температур ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ , регламент работ индивидуального продления срока службы вагонов электропоездов необходимо скорректировать.

В табл. 2 приведены данные для расчетов периодичности проведения обследований технического состояния несущих конструкций электропоездов ЭР1 и ЭР2. При этом предполагается, что условное количество месяцев до разрушения при испытаниях в нормальных климатических условиях будет вдвое меньшим.

Таблица 2 – Информация к расчету периодичности обследований несущих конструкций электропоездов ЭР1, ЭР2

№ п/п	Условн. № месяца	Условная скорость роста трещины	Примечание
1	2	3	4
	1	4	Зима
	2	4	Зима
	3	4	Зима
	4	1	

	5	1	
	6	1	
	7	1	
	8	1	
	9	1	
	10	1	
	11	1	
	12	1	
	13	4	Зима
	14	4	Зима
	15	4	Зима
	16	1	
	17	1	
	18	1	
	Средняя скорость	2	

При этом, средний период от разрушения до потери конструкцией несущей способности может составлять 8,8 месяцев, который не полностью стыкуется со временем между регламентными ремонтными работами.

Учитывая указанное, можно считать целесообразным проведение ежегодных обследований по схеме 1½, то есть [8], перед зимним периодом проводить диагностирование несущих конструкций по схеме поэтапного продления срока службы по регламенту ТР3, а весной – обследование по регламенту ТР2.

Вопрос ремонтпригодности несущих конструкций рам тележек и кузовов электропоездов, а также восстановление их прочности является отдельным научным вопросом и в данной работе не рассматривается.

Таким образом проведенная оценка периодичности обследований рам тележек электропоездов ЭР1 и ЭР2 позволяет сделать следующие выводы:

1. Средний период от появления трещины до потери конструкцией несущей способности может составлять 8,8 месяцев.

2. Указанный выше показатель живучести несущих конструкций электропоездов не полностью согласуется во времени между регламентными ремонтными работами.

3. Можно считать целесообразным проведение ежегодных обследований по схеме 1½, то есть, перед зимним периодом проводить диагностирование по схеме поэтапного про-

дления срока службы по регламенту ТРЗ, а весной – обследование по регламенту ТР2.

4. Вопросы ремонтпригодности несущих конструкций рам тележек и кузовов электропоездов и восстановление их прочности являются отдельным научным исследованием и в данной работе не рассматриваются.

#### **Выводы по выполненной работе и практическая значимость**

1. Анализ причин разрушений несущих конструкций подвижного состава показал, что основными причинами можно считать следующее:

- наличие посторонних включений в основной металл конструкции или сварного шва, некачественное выполнение сварных работ;
- неудачное конструктивное выполнение несущих конструкций подвижного состава;
- возникновение разрушений на месте выполненных работ по усилению или восстановлению показателей прочности НК;
- некорректное технологическое вмешательство в конструкцию подвижного состава;
- действие на несущие конструкции подвижного состава агрессивной среды и сезонных изменений температуры.

2. Результаты стендовых вибрационных испытаний рам тележек показали:

- уровень напряжений на этапе разрушения тележки может меняться (указанные изменения зафиксированы на большей части исследованных рам);
- в качестве эталонного образца для оценки сопротивления разрушению принята рама тележки зав. № 397 ( $N_{zi}=251200$ ,

$$N_c=1455440);$$

- с учетом того, что испытания проводились в нормальных климатических условиях, изменения характеристик трещиностойкости следует учитывать отдельно.

3. Оценка сопротивления разрушению рам тележек позволяет сделать следующие выводы:

- гипотетически, в зимний период трещина может развиваться до критического уровня приблизительно на протяжении 4-4,5 месяцев;
- обследование состояния несущих конструкций рам тележек целесообразно

проводить два раза на протяжении года: первый вспомогательный – на протяжении месяца второй половины октября; второй, основной – на протяжении месяца второй половины марта.

- для кузовов сохраняется регламент обследований таким же, как и для рам тележек.
4. Проведенная оценка периодичности обследований рам тележек позволяет сделать следующие выводы:
- средний период от разрушения до потери конструкцией несущей способности может составлять 8,8 месяцев;
  - указанный выше показатель живучести несущих конструкций электропоездов не полностью согласуется во времени между регламентными ремонтными работами
  - можно считать целесообразным проведение ежегодных обследований по схеме 1½, то есть, перед зимним периодом проводить диагностирование по схеме поэтапного продления срока службы по регламенту ТРЗ, а весной – обследование по регламенту ТР2.
  - вопросы ремонтпригодности несущих конструкций рам тележек и кузовов и восстановление их прочности являются отдельным научным исследованием и в данной работе не рассматриваются.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Бондарев О. М. Визначення строку служби несучих конструкцій моторвагонного рухомого складу із застосуванням методики порівняння їх динамічної навантаженості/ О.М. Бондарев, В.Л. Горобець, І.М. Грушак // Вісник Дніпропет. нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна, – Вип. 24, – Дніпропетровськ: Вид - во ДНУ ЗТ, 2008. – С.18-24.
2. Горобець В.Л. Аналіз експлуатаційної наробки несучих конструкцій рухомого складу в задачах продовження терміну його експлуатації /Горобець В.Л., Бондарев О.М. Скобленко В.М. // Вісник Дніпропет. нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна, – Вип. 35, – Дніпропетровськ: Вид - во ДНУ ЗТ, 2008. – С.18-24.
3. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций тягового подвижного состава. – К: Гос. администрация жд. транспорта Украины, ДИИТ, 1998. – 51 с.
4. Нормы расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава

железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М:ВНИИЖТ РФ,1997.

5. Проведення досліджень та підготовка технічних рішень по поетапному подовженню терміну служби електропоїздів ЕР1, ЕР2 до проведення їх капітально – відновлювального ремонту. : Звіт з НДР, тема № 91.243.02.02 - 153/02 – 957.02 – Цтех. № ДР 0103U003337. – Д: ДНУ ЗТ, 2003. – 97 с.
6. Розробка рекомендацій щодо збільшення ресурсу електропоїздів ЕР-1 на підставі проведення експериментально-аналітичних робіт Отчет по НИР, тема 91.126.97.98 - 197/97 - 563.97.98 – Цтех. – Дніпропетровськ: ДДТУЗТ, 1998. – 116 с.
7. Розробка рекомендацій щодо збільшення ресурсу електропоїздів ЕР-2 на підставі проведення експериментально-аналітичних робіт Отчет по НИР, тема 91.128.97.98 - 198/97 - 564.97.98 – Цтех. – Дніпропетровськ: ДДТУЗТ, 1998. – 112 с
8. Lin, Y. K. On statistical moments of fatigue crack propagation / Y. K. Lin, J. N. Yang // Ibid. 1986. - Vol. 25. - N 2. - P. 243-256.
9. Kozin, F. On the probabilistic modeling of fatigue crack growth / F. Kozin, J. L. Bogdanoff// Eng. Fract. Mech. 1983. - Vol. 18. -N 3. - P. 623-632.
10. Orowan E.O., Fundamentals of brittle behavior of Metals, “Fatigue and Fracture of Metals” (Murray W.M., ed), Wiley, N.Y., 1950, P. 139-167

<sup>1</sup> Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, б.2, вул. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна; 49010, тел./факс +380567931908, ел. пошта [onildpps@gmail.com](mailto:onildpps@gmail.com).

<sup>2\*</sup> Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, б.2, вул. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна; 49010, тел./факс +380567931908, ел. пошта [bondam286@gmail.com](mailto:bondam286@gmail.com)

Державна адміністрація залізничного транспорту України, вул. Тверська буд. 5 Київ, Україна; 150 тел./факс 0444651351, ел. пошта [ZRPZR@ukr.net](mailto:ZRPZR@ukr.net).

## **ПРО РОЗРОБКУ МІР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЕР1, ЕР2 ЗА МЕЖАМИ ВСТАНОВЛЕНОГО ТЕРМІНУ СЛУЖБИ**

**Ціль:** Метою роботи є наукове обґрунтування розробки технічного регламенту заходів та умов експлуатації електропоїздів серій ЕР1, ЕР2 за межами подовженого терміну експлуатації.

**Методика:** Для досягнення поставленої мети – наукового обґрунтування розробки технічного регламенту заходів експлуатації електропоїздів серій ЕР1, ЕР2 за межами подовженого терміну експлуатації (понад 50 років) було: проведено аналіз наукових публікацій з питань живучості основних елементів несучих конструкцій, які навантажуються динамічними знакозмінними навантаженнями; проведено аналіз результатів стендових вібраційних випробувань рам візків електропоїздів ЕР1, ЕР2, які були отримано на підставі розробленої методики проведення таких випробувань за участю авторів роботи та виконано відповідне їх наукове супроводження; розроблено технічні рішення з відповідними заходами при виконанні яких стає можливим продовжити строк експлуатації несучих конструкцій електропоїздів ЕР1 і ЕР2 понад 50 років.

**Результати:** На підставі комплексу проведених експериментальних та теоретичних чисельних досліджень отримано результати, які сприяли розробці методики щодо оцінки терміну розвитку тріщин в найбільш напружених точках основних несучих конструкцій рам візків та кузовів електропоїздів ЕР1, ЕР2 з досягненням їх небезпечних розмірів. Це надало можливість розробити технічний регламент заходів, що забезпечують безпечну експлуатації основних несучих конструкцій рам візків та кузовів електропоїздів ЕР1, ЕР2 за межами 50 років.

**Наукова новизна та практична значимість:** Для забезпечення безпечної експлуатації електропоїздів серій ЕР1, ЕР2 розроблено методику щодо оцінки терміну розвитку тріщин в найбільш напружених точках несучих конструкцій рам візків та кузовів з досягненням їх небезпечних розмірів. Розроблено технічний регламент заходів, що забезпечують безпечну експлуатації основних несучих конструкцій рам візків та кузовів електропоїздів ЕР1, ЕР2 за межами 50 років.

**Ключові слова:** візки, кузов, розрахункові моделі, експериментальні дослідження, теоретичні розрахунки, електропоїзди ЕР1, ЕР2, показники міцності.