

УДК 629.4.015

DOI: 10.34029/2311-4061-2019-133-4-19-28

Докт. техн. наук Леонець В.А.

Канд. техн. наук Кара С. В.

Магістр Прокопенко П.М.

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОВОЗІВ СЕРІЇ 2ТЕ10 ТА ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПРОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Ключові слова: локомотив, тепловоз 2ТЕ10, несучі конструкції, випробування, строк служби.

Вступ

Метою даної роботи є дослідження ресурсу несучих конструкцій тепловоза серії 2ТЕ10 в/і, які експлуатуються в АТ «Укрзалізниця», щодо можливості їх подальшої безпечної експлуатації поза продовженням терміном служби щонайменше на 20 років, у тому числі при виконанні комплексної модернізації. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- аналіз несправностей несучих конструкцій тепловозів серій 2ТЕ10 в/і;
- розробка програми та методики ходових динамічних та ходових міцнісних випробувань тепловозів серій 2ТЕ10 в/і;
- проведення ходових динамічних та ходових міцнісних випробувань тепловозів серій 2ТЕ10 в/і;
- дослідження втомної довговічності несучих конструкцій тепловозів серій 2ТЕ10 в/і;
- розробка технічного рішення щодо забезпечення експлуатації тепловозів серій 2ТЕ10 в/і поза продовженням терміном служби.

Методи дослідження – методи класичної механіки, об'єктно-орієнтованого програмування, цифрової обробки сигналів, математичної статистики, аналізу статичного та динамічного напружено-деформованого стану,

оцінки запасу опору втомі металевих конструкцій.

Аналіз показників експлуатації та несправностей несучих конструкцій тепловозів серії 2ТЕ10 в/і

Об'єктами дослідження прогібів та несправностей тепловозів серій 2ТЕ10 в/і обрали ТЧ-5 Тернопіль, ТЧ-7 Ковель, ТЧ-13 Чернівці, (рф «Львівська залізниця»), ТЧ-1 Одеса-Сортувальна, ТЧ-4 Помічна, ТЧ-5 Шевченко, ТЧ-6 Христинівка, ТЧ-8 Миколаїв (рф «Одеська залізниця»).

Станом на 14.11.2018 року загальний парк тепловозів 2ТЕ10 в/і складається з 202 секцій, а саме:

- 120 секцій 2ТЕ10М, з яких 50 секцій відносяться до експлуатованого парку, 70 до неексплуатованого;
- 70 секцій 2ТЕ10УТ, з яких 41 секція відноситься до експлуатованого парку, 29 до неексплуатованого;
- 12 секцій 2ТЕ10У, з яких 7 секцій відноситься до експлуатованого парку, 5 до неексплуатованого.

В цілому 98 секцій (48,5%) відносяться до експлуатованого парку, 104 до неексплуатованого (51,5%).

Проведений аналіз пробігів тепловозів 2ТЕ10 в/і (табл. 1) свідчить про наступне:

- у 100% тепловозів 2ТЕ10 в/і вичерпаний строк служби, встановлений заводом-виробником;
- середньорічний пробіг тепловоза 2ТЕ10 у середньому складає 76,85 тис. км, максимальний середньорічний пробіг складає 108-109 тис. км для тепловоза 2ТЕ10М-28.

Діаграма пробігів тепловозів від дати будівництва представлена на рисунку 1, де у вигляді стовпців приведено пробіг кожного окремого тепловоза серії 2ТЕ10 у порядку зростання.

Таблиця 1 – Роки побудови тепловозів 2ТЕ10 в/і

Рік побудови	Кількість секцій одного року побудови, шт.	Строк експлуатації, років
2ТЕ10М		
1985	14	33
1986	27	32
1987	11	31
1988	4	30
1989	4	29
2ТЕ10УТ		
1990	4	28
1991	9	27
1992	22	26
2ТЕ10У		
1992	6	26

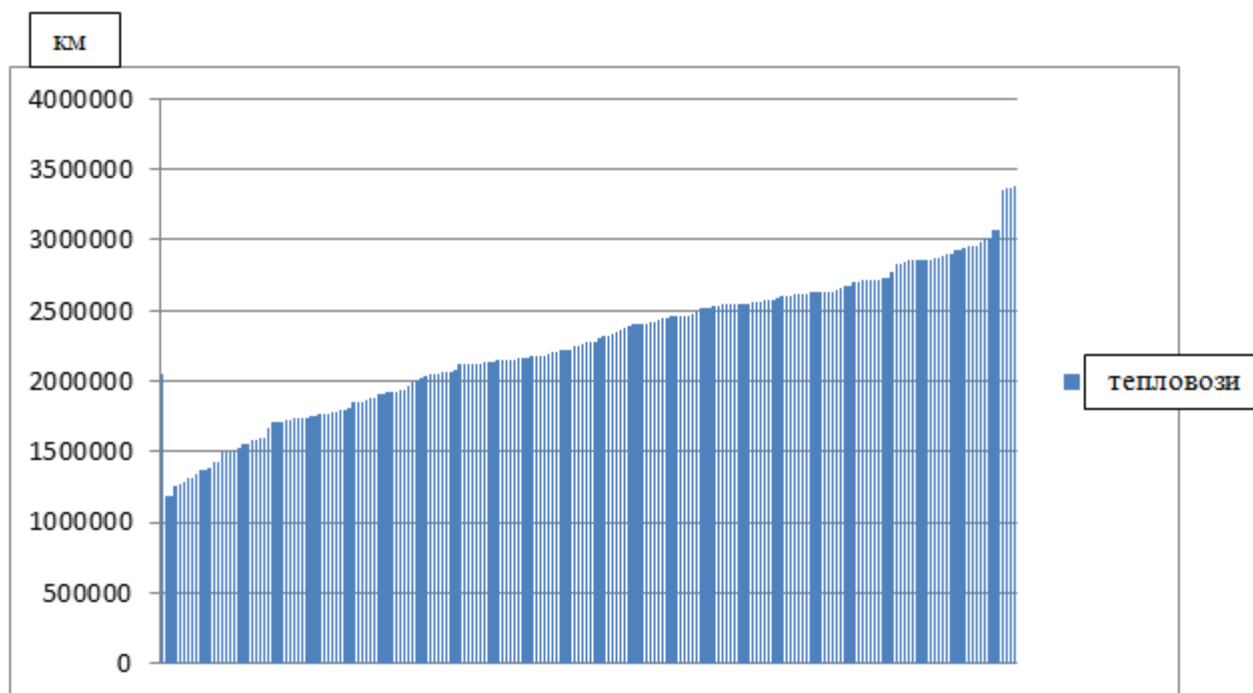


Рис. 1 – Діаграма пробігів тепловозів серій 2ТЕ10 в/і

Типових місць відказів несучих металевих конструкцій рам візків та рам кузовів для тепловозів серії 2ТЕ10 в/і, які задіяні в перевезеннях АТ «Укрзалізниця» не знайдено. Відомо випадок тріщини в районі шворня на рамі кузова.

При цьому слід відзначити, що локомотиви серій 2ТЕ10 в/і, які працюють у кар'єрах на тимчасових коліях мають значну кількість відказів несучих металевих конструкцій, внаслідок відмінного блоку навантаження конс-

трукцій. Типові місця відказів візків локомотивів 2ТЕ10 приведені на рисунку 2: 1 – з'єднання бокових рам з торцевими, 2 – з'єднання бокових рам з поперечними, 3 – зони опорно-повертаючих пристроїв, 4, 5 – кронштейни підвісу тягових електродвигунів, 6 – зони технологічних отворів боковин, 7 – зварні з'єднання на боковинах, 8 – шворнева балка.

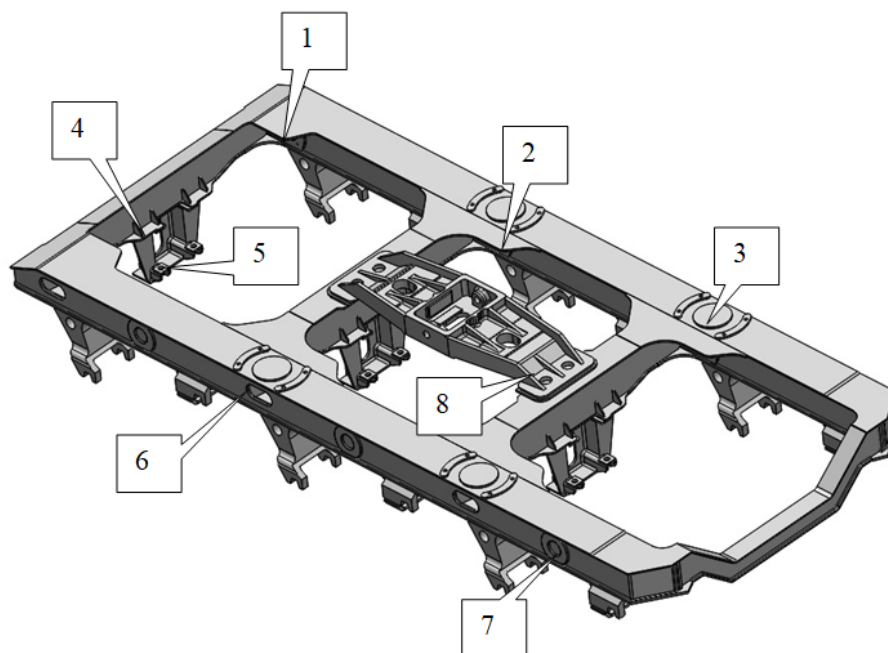


Рис. 2 – Типові місця виникнення тріщин для рам візків 2ТЕ10, які працюють у кар'єрах

Типові місця відказів рам кузовів локомотивів 2ТЕ10, які працюють у кар'єрах на тимчасових коліях, приведені на рисинку 3: 1 – зони кронштейнів опорно-повертаючих пристроїв (зварні шви, основний метал, пришовні

зони), 2 – зварні шви з'єднання повздовжніх балок з іншими елементами рами, 3,4 – зони шворнів, зварні шви близько розташованих елементів.

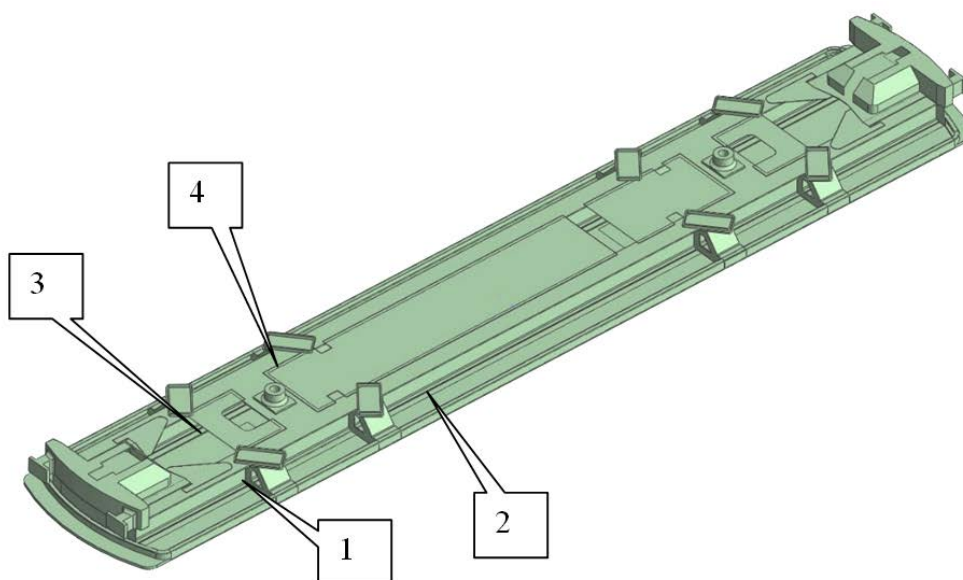


Рис. 3 – Типові місця виникнення тріщин для рам кузовів 2ТЕ10, які працюють у кар'єрах

Випробування тепловозів серій 2ТЕ10 в/і

В рамках проведення дослідження розроблено програму та методику НДКТІ/НВЦ УІ 007-18 ходових динамічних та ходових міц-

нісних випробувань тепловозів серій 2ТЕ10 в/і (далі – ПМ).

Згідно ПМ було встановлено вимірювальне обладнання на тепловоз 2ТЕ10М № 2606, секція Б (рис. 4).

Приклади встановлення засобів вимірювальної техніки (тензорезисторів) приведено на рисунку 5.



Рис. 4 – Дослідний тепловоз 2ТЕ10М №2606

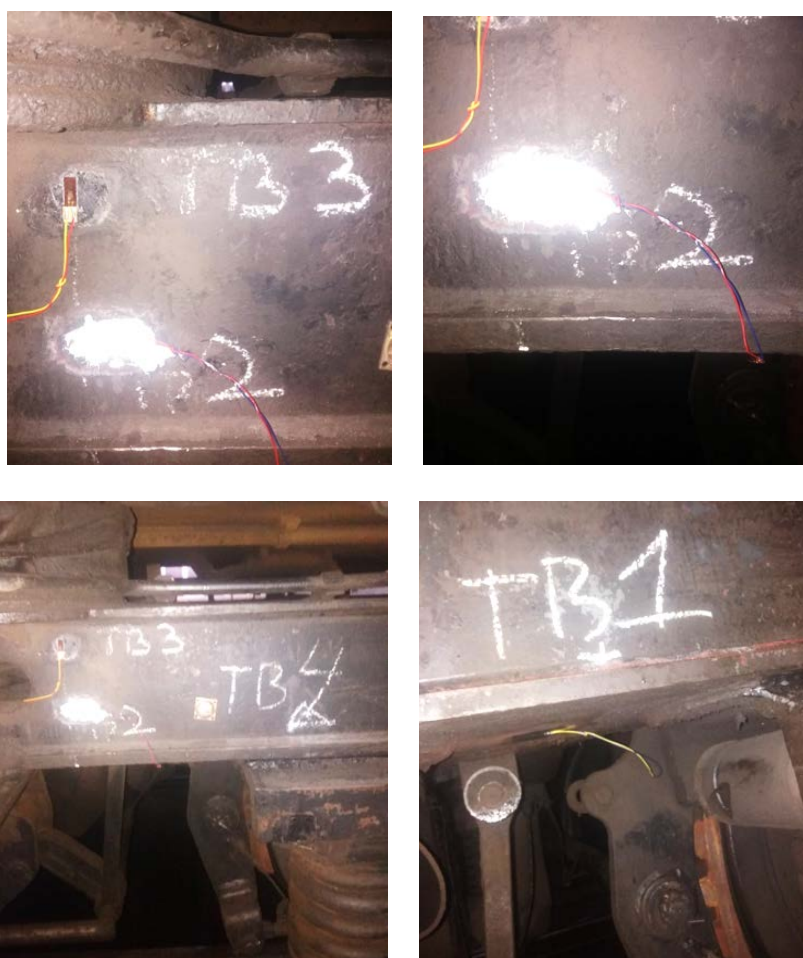


Рис. 5 – Приклади встановлення тензорезисторів на рамі візка тепловозу 2ТЕ10М

Випробування було проведено 12 жовтня 2018 р. на ділянці колії Миколаїв – Апосто-
лово – Миколаїв з поїздами масами 4600 т. та
4700 т. Маса поїзда, режим ведення поїзда та
показники навколишнього середовища від-
повідали вимогам ПМ.

**Експериментальне визначення показ-
ників втомної міцності рам візків тепловозів
2ТЕ10 в/і**

В методиці оцінки ресурса несучих конс-
трукцій тягового рухомого складу [3] наведе-
ні результати виконаних випробувань на
втому рам візків тепловозів 2ТЕ10М у вихід-
ному стані та після експлуатації протягом 25
років (рис.6).

Авторами прийнято допущення, що гра-
ниця витривалості рам візків після 25 років
експлуатації в Україні (на всіх коліях АТ
«Укрзалізниця») близька до величини грани-
ці витривалості, отриманої після 25 років
експлуатації в рамках проведених дослі-
джень [3].

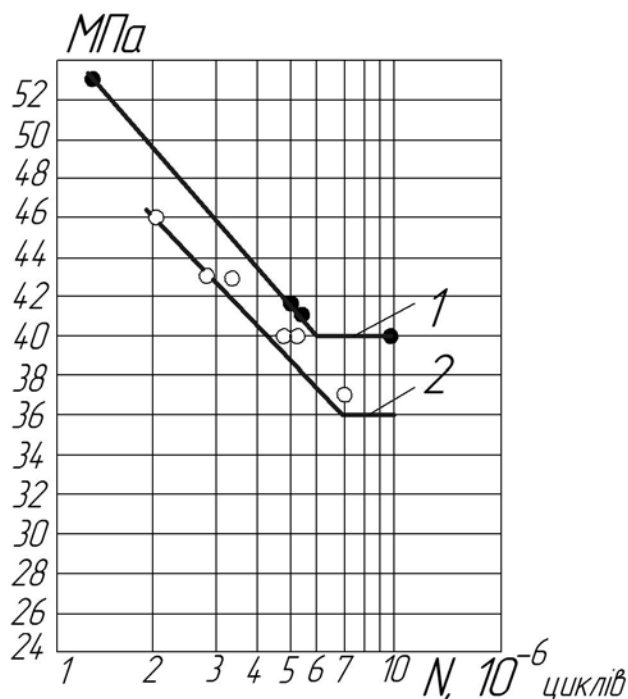


Рис. 6 - Криві втоми рам візків тепловозів
2ТЕ10М: 1- у вихідному стані, 2 - після
експлуатації 25 років

Границя витривалості рам візків у вихід-
ному стані $\sigma_{-1д}=40$ МПа, число циклів яке
відповідає точці зламу кривої втоми
 $N_0=6 \cdot 10^6$ циклів.

Границя витривалості рам візків після 25
років експлуатації $\sigma_{-1д}=36$ МПа, точка пере-

лому кривої у напівлогарифмічних коорди-
натах $N_0=5,96 \cdot 10^6$ циклів.

Для візків у вихідному стані кут нахилу
кривих втоми m визначено по формулі:

$$m = \frac{\lambda_i}{\lg\left(1 + \frac{\lambda_i}{h}\right)}, \quad (1)$$

$$\text{де } \lambda_i = \lg N_0 - \lg N_i.$$

При $\sigma_i=46$ МПа, $N_s=3 \cdot 10^6$ циклів $m=5$.

Після 20 років експлуатації кут нахилу
кривої втоми визначено при $\sigma_{ai}=46$ МПа,
 $N_i^I=2 \cdot 10^6$, $m=5$.

Приймаємо, що імовірність безвідмовної
роботи рам візків тепловозів серій 2ТЕ10в/і
повинна становити $p=0,01\%$ [5]; розподіл ам-
плітуд напружень, які виникають в рамі візка
можливо описати нормальним законом. При
цьому імовірність безвідмовної роботи ста-
новить $1-p=1-0,0001=0,9999$. Величина ква-
нтіля становить $U_p=3,719$.

Величина U_p вираховується по формулі:

$$U_p = \frac{1 - \bar{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2 v_e^2 + v_e^2}}, \quad (2)$$

де: U_p - квантиль нормального розподілу,
відповідаючий імовірності руйнування p , %;

\tilde{n} - відносний коефіцієнт запасу міцності;

$v_e \sigma, v_e$ - коефіцієнти варіації нормального
розподілу величин границі витривалості $\sigma_{-1д}$
та максимального напруження σ_{amax} в дію-
чому блоці навантажень.

Відносний коефіцієнт запасу вираховуємо
по формулі:

$$\tilde{n} = \frac{n_p}{K_H} = \frac{\sigma_{amax}^{пред}}{\sigma_{amax d}}, \quad (3)$$

де: $K_H = \frac{\sigma_{amax d}}{\sigma_{-1д}}$ - дійсний коефіцієнт зава-
нтаженості конструкції.

Вважаємо, що $v_e \sigma = 0,05 \div 0,15$, а $v_e = 0,1$
 $\div 0,2$ [8].

Величину \tilde{n} можливо вирахувати по фор-
мулі:

$$\tilde{n}^2 (1 - U_p^2 v_e^2) - 2\tilde{n} + 1 + U_p^2 v_e^2 = 0. \quad (4)$$

При $U_p=3,719$; $\nu_e \sigma = 0,13$; $\nu_e = 0,13$ $\tilde{n} = 1,64$.

При $U_p=3,719$; $\nu_e \sigma = 0,12$; $\nu_e = 0,19$ $\tilde{n} = 2,22$.

Приймаємо для розрахунків ресурсу рам візків $\tilde{n} = 2,22$.

Під час проведення випробувань теплового 2ТЕ10М № 2606 були визначені гістограми швидкостей руху поїзда в прямому та оберненому напрямках (рис. 7). Експериментально встановлено, що найбільші напруження розтягу виникають в боковинах рам

візків при швидкості 65 км/год, русі поїзда в напрямку “Миколаїв - Апостолово”.

Для визначення ймовірності виникнення втомної тріщини в боковині рами візка теплового 2ТЕ10М методом напівциклів побудовано блок напружень, виникаючих в місці встановлення тензорезистора ТВ1 (рис. 5). Результати вимірювань виникаючих при цьому напружень наведені в таблиці 2. Блок напружень (перетворений) для розрахунків ресурсу наведено у таблиці 3.

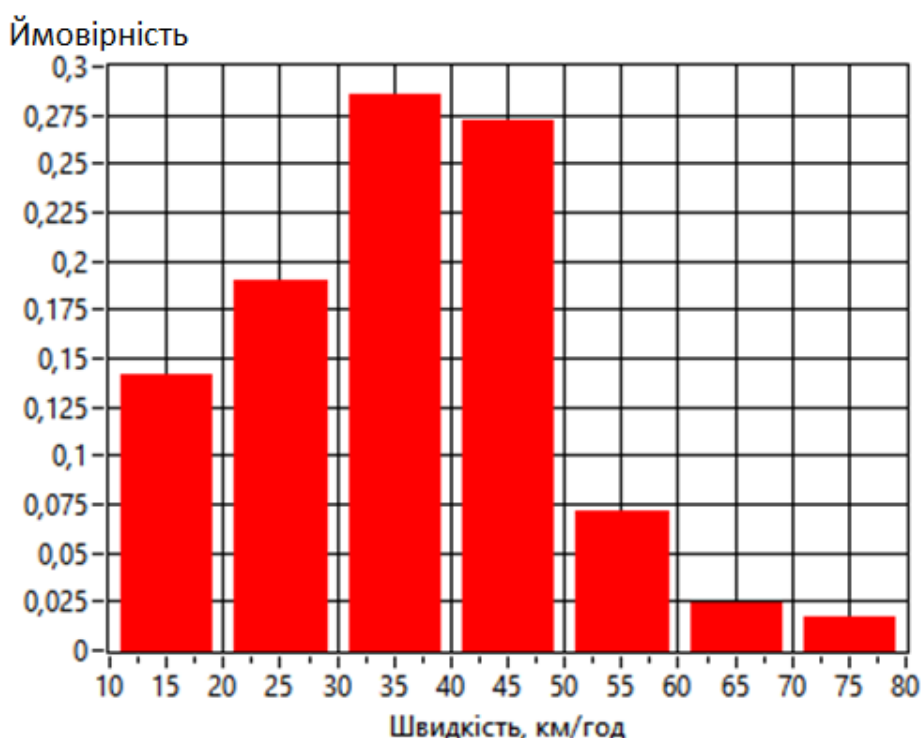


Рис 7. – Гістограми швидкостей руху поїздів в напрямках “Миколаїв - Апостолово” та “Апостолово-Миколаїв”

Табл. 2 – Блок напружень рами візка при швидкості 65 км/год

σ_a МПа N	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1414	2396	1375	328	6	0	0	0	0	0	0
2	1141	1524	1150	659	240	185	116	22	0	0	0
3	248	2011	2969	709	46	31	13	0	0	0	0
4	617	2332	2081	825	65	0	0	0	0	0	0
5	881	1875	1693	611	212	15	0	0	0	0	0
6	1502	580	124	10	0	0	0	0	0	0	0
7	1833	1378	416	51	0	0	0	0	0	0	0
8	2004	153	42	11	0	0	0	0	0	0	0

9	1828	1357	644	245	28	1	0	0	0	0	0
10	2093	1270	324	69	18	2	0	0	0	0	0
11	1582	1708	901	459	180	70	4	0	0	0	0
12	1060	1599	1514	893	260	39	24	1	0	0	0
15	0	1	92	1091	2791	1771	288	3	0	0	0
16	0	0	18	411	1783	2394	1039	337	55	0	0
17	0	0	19	338	1635	2311	1520	220	5	0	0
18	0	1	34	230	1013	1865	2007	732	123	0	0
19	523	783	554	648	1350	1350	524	87	8	23	0
20	2027	1894	486	44	14	0	0	0	0	0	0
Σ	18753	20862	14436	7542	9641	10034	5535	1402	191	23	0
$\Sigma_{\text{заг.}}$	88419										

Табл. 3. – Розрахунковий блок напружень рами візка при швидкості 65 км/год

$\sigma_{ai}, \text{МПа}$	$\sigma_{ai} / \sigma_{amax}$	t_i	$(\sigma_{ai} / \sigma_{amax})^m \cdot t_i$
2	0,1	0,21209	0,0000021
4	0,2	0,23594	0,0000755
6	0,3	0,16327	0,0003967
8	0,4	0,08530	0,0008735
10	0,5	0,10904	0,0034074
$\sigma_{ai}, \text{МПа}$	$\sigma_{ai} / \sigma_{amax}$	t_i	$(\sigma_{ai} / \sigma_{amax})^m \cdot t_i$
12	0,6	0,11348	0,0088244
14	0,7	0,06260	0,0105211
16	0,8	0,01586	0,0051958
18	0,9	0,00216	0,0012756
20	1	0,00026	0,0002601

 t_i – відносний час руху тепловоза при $\sigma_{ai} = \text{const}$.

Коефіцієнт перевантаженості n_p вираховується по формулі:

$$n_p = \tilde{n} \cdot n = 2,22 \cdot \sigma_{amax} / \sigma_{1Д} = 2,22 \cdot 20/36 = 1,233. \quad (5)$$

Величина $1/n_p = 1/1,233 = 0,8$.

Величина $\Sigma \sigma_{ai} / \sigma_{amax}$, яка менша 0,8 в розрахунках не враховується. Тому в подальших розрахунках використовуємо значення $\sigma_{ai} = (16 \div 20)$ МПа.

Значення суми $\Sigma (\sigma_{ai} / \sigma_{amax})^m \cdot t_i = 0,8^5 \cdot 0,01586 + 0,9^5 \cdot 0,00216 + 1,0^5 \cdot 0,00026 = 0,006731482$.

Сумарне число циклів $N_{\text{сум}}$ за термін служби локомотива визначається по формулі:

$$\frac{N_{\text{сум}}}{N_0} = \frac{a_p}{n_p^m \cdot \Sigma (\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}})^m \cdot t_i}, \quad (6)$$

$$\text{де: } \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \geq \frac{1}{n_p};$$

N_0 - число циклів, яке відповідає точці зламу кривої втоми (рис.7);

$a_p = 0,8$ - параметр, корегуючий лінійну гіпотезу накопичення втомних пошкоджень при нерегулярному навантаженні;
 n_p - коефіцієнт перевантаження.

Після експлуатації локомотивів серії 2ТЕ10 в/і протягом 25 років вважаємо, що $\sigma_{1Д} = 36$ МПа, $N_0 = 5,96 \cdot 10^6$ циклів, $m = 5$. Тому визначаємо $N_{\text{сум}} = 248 \cdot 10^6$ циклів.

Число циклів коливань рами візка в експлуатації при русі тепловоза з швидкістю 65 км/год розраховано по формулі:

$$n_i N_i = \frac{L_1}{V_{cp}} \cdot f \cdot P_{\Sigma} \cdot 3600, \quad (7)$$

де: L_1 – пробіг локомотива за рік, при цьому приймаємо $L_1 = 141,12 \cdot 10^3$ км. V_{cp} – середня технічна швидкість вантажного поїзда при конструктивній швидкості 90 км/год, яку приймаємо $V_{cp} = 42$ км/год;

f – основна частота зміни амплітуд навантаження рами візка тепловоза і за результатами обробки результатів ходових динамічних випробувань встановлено, що $f = 2$ Гц;

P_{Σ} – доля руху поїзда з швидкостями 35÷65 км/год.

Тепловози серій 2ТЕ10 в/і одночасно задіяні як у вантажних перевезеннях, так і у пасажирських. На основі досвіду проведення аналогічних досліджень приймаємо $P_{\Sigma} = 0,25$.

Число циклів коливань рами візка при експлуатації тепловоза становить:

$$N_{i\text{ван.}} = (141,12 \cdot 10^3 / 42) \cdot 2 \cdot 0,25 \cdot 3600 = 6,048 \cdot 10^6 \text{ циклів.}$$

Після 25 років експлуатації залишковий ресурс становить:

$$\tau_{p\text{ ван.}}^1 = 248 \cdot 10^6 / 6,048 \cdot 10^6 = 41 \text{ рік.}$$

Загальний розрахунковий ресурс візків становить:

$$\tau_{p \geq 20\text{ ван.}} = 25 \text{ років} + 41 \text{ рік} = 66 \text{ років.}$$

На підставі наведених результатів розрахунків встановлено, що тепловози серії 2ТЕ10 в/і після експлуатації 33 років мають залишковий ресурс за критерієм ймовірності 0,01% виникнення втомних тріщин 33 роки.

За результатами аналізу відмов несучих конструкцій тепловозів 2ТЕ10 в/і, проведених випробувань, розрахунків залишкового ресурсу та досвіду продовження строку служби тягового рухомого складу було розроблено карти контролю технічного стану (КТС) несучих конструкцій локомотива при виконанні робіт з продовження його строку служби (схеми місць проведення технічного діагностування приведено на рисунках 8, 9).

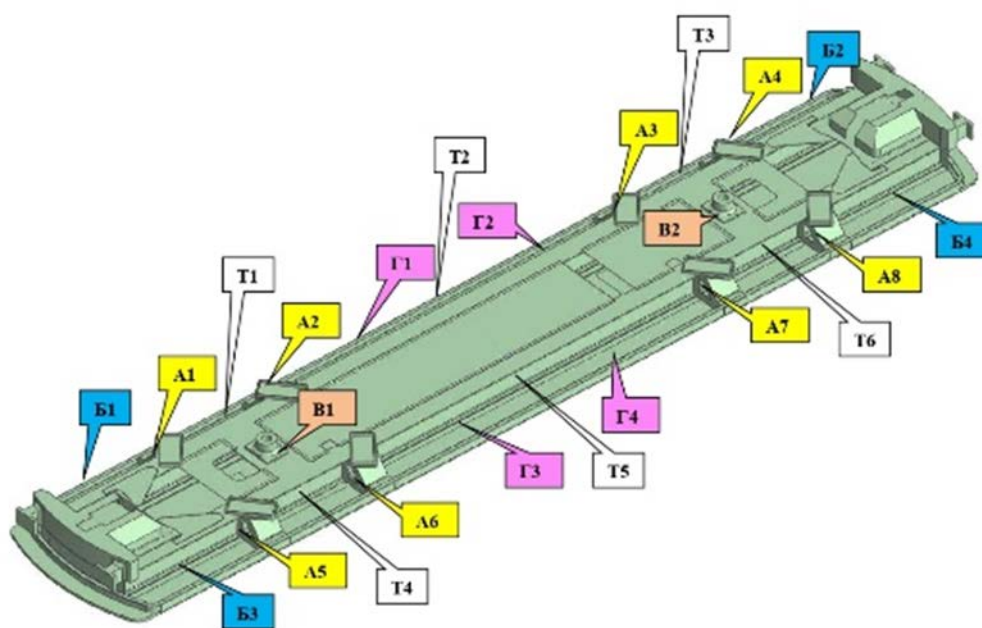


Рис.8 – Карта КТС рами тепловоза 2ТЕ10 в/і

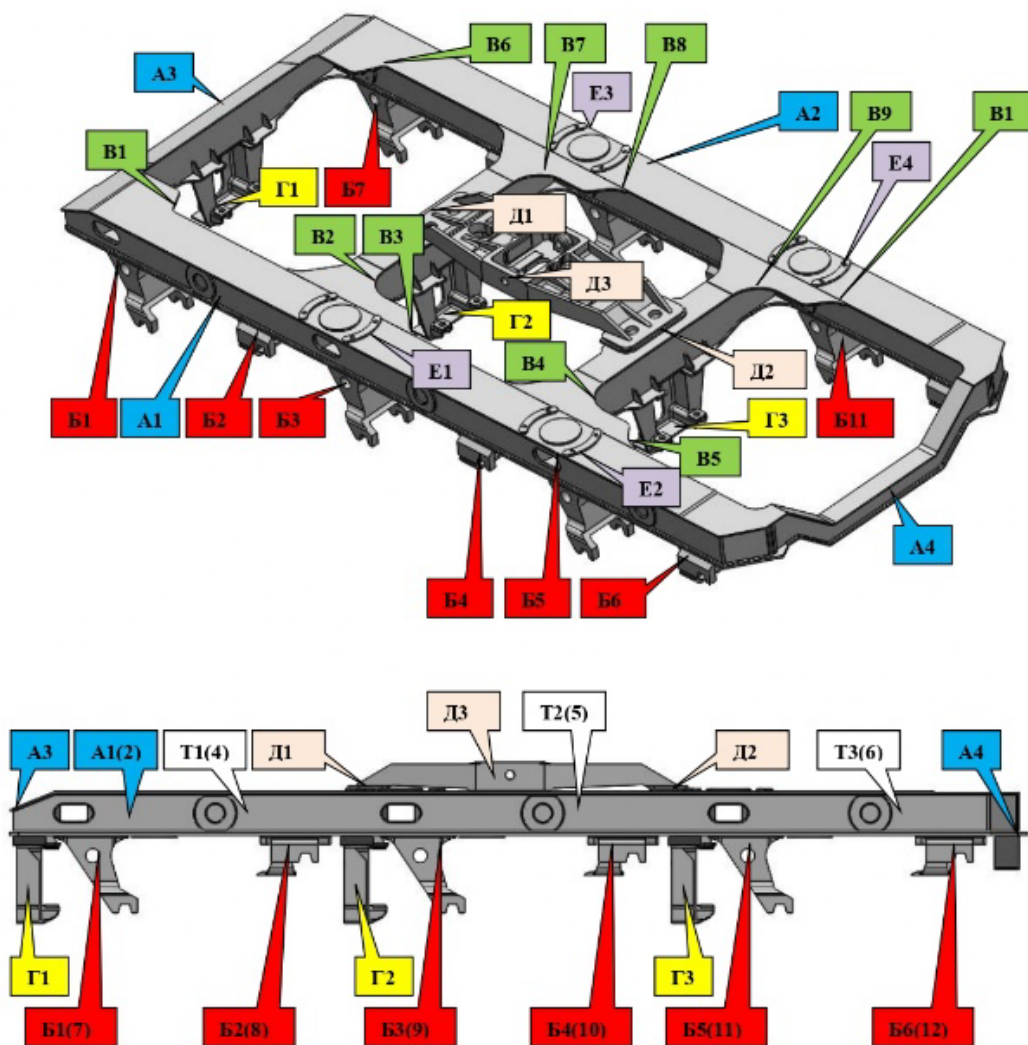


Рис.9 – Карта КТС рами візка тепловоза 2ТЕ10 в/і

На основі проведених досліджень, експертним шляхом встановлено порядок подальшого продовження строку служби несучих конструкцій тепловозів серії 2ТЕ10 в/і, який полягає у встановленні міжконтрольного періоду для виконання регламентних робіт з продовження терміну служби несучих конструкцій не рідше ніж раз у 3 роки. Дане рішення прийняте на основі оцінки залишкового ресурсу за критерієм ймовірності виникнення втомних тріщин у несучих металевих конструкціях локомотива з періодичністю, що відповідає строкам проведення ТО3, КР. Термін дії технологічних та організаційних заходів з забезпечення подальшої експлуатації тепловозів серії 2ТЕ10 в/і за межами продовженого терміну служби, до проведення повторних комплексних досліджень щодо визначення можливості подальшої безпечної

експлуатації, встановлено на рівні 55 років від побудови локомотива.

Висновки

Проведені комплексні дослідження несучих металевих конструкцій тепловозів серії 2ТЕ10 в/і з метою оцінки можливості його подальшої безпечної експлуатації на 20 років дають підстави для наступних висновків.

1. Всі тепловози 2ТЕ10 в/і АТ «Укрзалізниця» мають вичерпаний строк служби, встановлений заводом-виробником. Середньорічний пробіг тепловоза 2ТЕ10 в/і у середньому складає 76,85 тис. км, максимальний середньорічний пробіг складає 108-109 тис. км для тепловоза 2ТЕ10М-28.

2. Типових місць відказів несучих металевих конструкцій рам візків та рам кузовів для тепловозів серії 2ТЕ10 в/і, які задіяні в перевезеннях АТ «Укрзалізниця», не виявлено.

Відомо про випадок тріщини в районі шворня на рамі кузова.

Локомотиви серій 2TE10 в/і, які працюють у кар'єрах на тимчасових коліях мають значну кількість типових місць відказів несучих металевих конструкцій, а саме:

- типові місця тріщин на рамах візків: з'єднання бокових рам з торцевими, з'єднання бокових рам з поперечними, зони опорно-повертаючих пристроїв, кронштейни підвісу тягових електродвигунів, зони технологічних отворів у боковинах, зварні з'єднання на боковинах, шворнева балка;

- типові місця тріщин на рамах кузовів: зони кронштейнів опорно-повертаючих пристроїв (зварні шви, основний метал, пришовні зони), зварні шви з'єднання повздовжніх балок з іншими елементами рами, зони шворнів, зварні шви близько розташованих до шворнів елементів.

3. За результатами проведення ходових динамічних та міцнісних випробувань тепловоза 2TE10м № 2606, секція Б, та оцінки опору втоми підтверджено, що залишковий ресурс несучих металевих конструкцій дозволяє подальшу експлуатацію цього локомотива на строк щонайменше 20 років, за критерієм ймовірності 0,01% виникнення втомних тріщин.

4. Для продовження строку служби несучих конструкцій тепловозів серії 2TE10 в/і (у т.ч. 2TE10М, 2TE10У, 2TE10УТ) необхідно встановити міжконтрольний період для виконання регламентних робіт з продовження терміну служби несучих конструкцій не рідше ніж раз у 3 роки. Термін дії технологічних та організаційних заходів з убезпечення подальшої експлуатації тепловозів серії 2TE10 в/і за межами продовженого терміну служби, до проведення повторних комплексних досліджень щодо визначення можливості подальшої безпечної експлуатації становить 55 років від побудови локомотива.

Література

1. Нормы расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М.: ВНИИЖТ, 1998. – 145 с. (Нормативный документ МПС РФ).

2. Положення про організацію робіт щодо продовження призначеного терміну служби

тягового рухомого складу Укрзалізниці (рам візків, головних рам кузовів і несучих кузовів): ВНД 32.007.123-03. – Київ: Міністерство транспорту України, 2002. – 15 с. (Нормативний документ Мінтранса України).

3. Методика оценки ресурса несущих конструкций тягового подвижного состава железных дорог Украины (проект). Киев: ЦТ Укрзалізниці, 2001. – 63 с.

4. Черняк А.Ю. Модальный анализ и усталостная долговечность рам тележек тягового подвижного состава / А.Ю. Черняк, Е.О. Гриндей, П.А. Гриндей // Локомотив информ. – 2010. – № 11. – С. 4–7.

5. Браславец Ю.В. Відновлення та модернізація ушкоджених конструкцій електровоза ВЛ82М №067 / Ю.В. Браславец, О.П. Коломієць, С.В. Кара, П.А. Шевчук // Залізничний транспорт України. Науково-практичний журнал. – 2016. – № 5-6. – С. 35-40.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Леонець Віктор Адамович

д. т. н., старший науковий співробітник науково-дослідного відділу динаміки та міцності філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» (НДКТІ) АТ «Укрзаліниця».

Вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, Україна.

Кара Сергій Віталійович,

к. т. н., начальник науково-дослідного відділу динаміки та міцності філії «НДКТІ» АТ «Укрзаліниця».

Вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, Україна. Тел.: +38 063 452 62 52.

E-mail: kara1520mm@gmail.com.

Прокопенко Павло Миколайович,

провідний інженер науково-дослідного відділу динаміки та міцності філії «НДКТІ» АТ «Укрзаліниця».

Вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, Україна. Тел.: +38 063 021 11 97.

E-mail: prokopenko1520mm@gmail.com.