

УДК 621.791.052:629.488

С. Білодіденко¹, докт. техн. наук; В. Гануш¹;
В. Даценко²; М. Островерхов², канд. техн. наук

¹ Національна металургійна академія України

² Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту

ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОДОВЖЕННІ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ КОЛІЙНИХ МАШИН

Резюме. Розглянуто передумови та проблеми продовження ресурсу рухомих технологічних машин. Представлено методику оцінювання безпеки та продовження їх ресурсу. Методику наведено на прикладі продовження терміну служби автомотрис АДМ.

Ключові слова: ресурс, автомотриса, рама, безпека.

S. Belodedenko, V. Ganush, V. Datsenco, N. Ostroverhov

ESTIMATE OF SAFETY AT THE PROLONGATION SERVICE LIFE OF AUTONOMOUS MACHINES

The summary. Preconditions and problems of prolongation resource of mobile technological machines purpose are considered. The technique of prolongation their safe resource is resulted. It is set an example of a substantiation of the prolonged service life autonomous car ADM.

Key words: resource, autonomous, frame, safety.

Постановка проблеми. Розрахунки, що стосуються продовження ресурсу конструкцій, проводяться в багатьох галузях техніки. У результаті цього необхідно з'ясувати показники надійності та безпеки як функцію терміну служби. Методика продовження ресурсу із труднощами піддається уніфікації, тому для кожного класу машин і споруджень розробляється окремо з урахуванням імовірних ризиків. Активно проводяться роботи з обстеження й продовження терміну експлуатації рухомого складу залізничного транспорту. Однак у цьому аспекті недостатньо уваги приділяється спеціальним самохідним засобам, які багато в чому визначають надійність і безпеку транспортних перевезень.

Базові конструкції самохідних колійних і мобільних транспортно-технологічних машин спроектовані зі значними запасами міцності. Рами таких машин являють зварену конструкцію з ортогонально розташованих балок, як правило, відкритого профілю. Вибір форми і розмірів перетинів, а також розташування балок зумовлені різними міркуваннями, до яких належать стійкість і жорсткість конструкції, можливість розміщення механізмів і устаткування.

Для об'єктів рухомого складу, побудованих в 70-80 роках, оцінювання опору втомі проводили по запасах міцності, де в якості діючих ухвалювали еквівалентні напруження, що залежать від терміну служби і показників гауссівського процесу. При цьому запас міцності стосовно гарантованого з імовірністю 95% границі витривалості призначався не менше двох [1]. Тому є передумови для продовження експлуатації таких конструкцій після 20–30 років роботи.

Питання продовження ресурсу вирішується після оцінювання технічного стану базових несучих конструкцій. Заміна цих конструкцій за час призначеного терміну експлуатації не передбачена. Можливий лише ремонт або модернізація деяких елементів базових конструкцій. Оскільки наслідки від їхнього руйнування значні, продовження ресурсу пов'язане із прогнозуванням безпеки експлуатації. Критерієм

безпеки є збереження цілісності основних несучих елементів конструкцій. Для автомотрис такими елементами є поздовжні балки.

При проектуванні рам не проводили оцінювання показників надійності автомотрис, та не ставили питання про оснащення машин засобами контролю технічного стану механічних систем. На сьогодні немає обґрунтованої можливості визначити обсяг роботи, виконаний парком обстежуваних машин, щоб розрахувати накопичене втомне пошкодження. Тому продовжений ресурс визначається як наново призначений, що тягне виконання повного комплексу робіт, властивих проблемі надійності машин і споруджень.

Аналіз рівня досліджень та мета роботи. Обґрунтування продовження ресурсу рухомого складу – багатопланова задача, де поєднуються експериментальні та розрахункові методи. Їх послідовність складає певний алгоритм (методику), який багато в чому пов'язаний з економічними міркуваннями. Для залізничного транспорту наріжним каменем алгоритму є ходові випробування, під час яких визначають експлуатаційні процеси навантаження елементів несучих конструкцій. Це досить відповідальний етап, який слушно робити за допомогою спеціалізованих бортових вимірювальних комплексів [2].

Далі для магістрального складу проводять стендові випробування, які націлені на визначення слабких місць і характеристик опору втомі несучих конструкцій [3,4]. Програма стендових випробувань може бути побудована також на безпосереднє визначення показників надійності [1]. Окрім того, іноді випробування конструкцій, що відпрацювали призначений ресурс, супроводжуються обстеженням неруйнівними методами контролю пошкоджень [4].

На роботі з обґрунтування ресурсу колійних машин виділяється на порядок менше коштів, аніж для магістрального транспорту. Тому проведення стендових випробувань тут невиправдане. У цьому випадку моделі опору втомі розробляють на підставі випробувань малогабаритних зразків, що вирізані з натурної конструкції. З цього впливає необхідність розроблення відповідного діагностичного алгоритму, що є метою даної роботи. В статті продемонстровано заключні етапи методики, коли після експериментальних досліджень треба обґрунтувати термін продовження експлуатації.

Методика обґрунтування продовження ресурсу базових конструкцій мобільних машин. Для об'єктів, які не можуть бути піддані стендовим випробуванням (зокрема візки рухомого складу), у процесі роботи над обґрунтуванням продовження ресурсу рам автомотрис типу АГВ, ДМС, АДМ і ДГКу встановилася відповідна послідовність етапів, що утворює методику (табл. 1).

Таблиця 1. Методика обґрунтування продовження ресурсу базових конструкцій мобільних машин

№ етапу	Етап роботи	Результат етапу
1	Статичний розрахунок МСЕ	1.1. Найбільш навантажені зони, локальні напруження та деформації. 1.2. Вид напружено-деформованого стану. 1.3. Середні напруження циклу
2	Тензометрування діючого екземпляра машини при ходових випробуваннях	2.1. Зони з максимальною циклічною навантаженістю. 2.2. Реєстрація процесів навантаження для різноманітних режимів
3	Статистичне опрацювання процесів навантаження	3.1. Математичне очікування і середньоквадратичні відхилення циклічних напружень процесів для різноманітних режимів. 3.2. Графіки спектральної потужності
4	Формування блоків навантаження	4.1. Узагальнені параметри процесів від кожного датчика з урахуванням повторюваності швидкостей. 4.2. Ефективна частота формалізованого блока та параметри її варіації. 4.3. Амплітудні напруження та відносна тривалість рівнів блока. 4.4. Асиметрія циклів блоків та еквівалентні режими втомних випробувань
5	Втомні випробування натурних конструкцій	5.1. Ступінь деградації механічних властивостей металу. 5.2. Характеристики опору втомі (ХОВ) та тріщиностійкості. 5.3. Модель опору циклічним навантаженням
6	Оцінювання показників безпеки та продовження (залишкового) ресурсу	6.1. Запаси міцності та гарантовані запаси довговічності. 6.2. Допустимі розміри тріщин

Відповідно до цієї методики проведено дослідження автотриси типу АДМ. Розрахункова схема рами для статичного розрахунку по МСЕ враховує дію основних навантажень від функціонування технологічного устаткування. Динамічні (циклічні) навантаження отримані експериментально при ходових випробуваннях на різних швидкостях і типах шляхів. У результаті синтезу навантаження формується багаторежимний процес, при якому прогнозування довговічності має свої особливості. У цьому зв'язку важливо, щоб прийняті для розрахунків ХОВ відповідали діючим режимам. Статистичне опрацювання процесів навантаження полягала в реєстрації максимумів напруг за період 15с. (згладжування) і визначенні амплітудної і середньої напруги. Обробка по двох силових параметрах дозволяє вважати діючі випадкові процеси вузькосмуговими.

Узагальнення параметрів процесів з урахуванням повторюваності швидкостей для кожного датчика дає можливість виключити один із двох факторів багаторежимності – швидкість. Тоді розрахунки надійності й безпеки проводяться для двох-трьох процесів, що відрізняються типом шляху.

Якщо є можливість досліджувати раму шляхом руйнуючого контролю, то вирізку фрагментів конструкції потрібно робити із зон з різним рівнем напруженості. Це дає можливість оцінити ступінь вичерпання ресурсу й деградації властивостей матеріалу.

Показниками надійності при продовженні терміну експлуатації є запаси міцності й довговічності. В основі їх розрахунків лежить функція розподілу довговічностей $n_o(P)$ і числа циклів напрацювань $n_\Sigma(P)$. Функція $n_o(P)$ апроксимована логнормальним розподілом, а функція $n_\Sigma(P)$ – нормальним розподілом, які в логарифмічній шкалі числа циклів виглядають кривими для різних термінів служби L (рис. 1).

Перетин ліній $n_\Sigma(P)$ та $\lg n_o(P-1)$ відповідає ймовірності безвідмовної роботи (ВБР) за період довговічності n_p . Якщо встановити необхідний рівень безпеки P , то відношення відповідної йому довговічності $n_{o\min}$ до відповідного йому ж напрацювання $n_\Sigma(P)$ визначить гарантований запас довговічності або індекс безпеки. Ця характеристика є аналогом індексу надійності, який використовується при ймовірнісних розрахунках трубопроводів. Індекс безпеки визначають як

$$\beta_p = \frac{10^{\lg n_{o\min}}}{n_{\Sigma\max}}, \quad (1)$$

де $\lg n_{o\min} = \bar{\lg} n_o - u_p \cdot S_{\lg n_o}$;

$$n_{\Sigma\max} = \bar{n}_\Sigma + u_p \cdot S_{\lg n_\Sigma};$$

u_p – квантиль нормального розподілу ймовірності P .

Індекс безпеки β_p показує, у скільки разів «перекритий» рівень ВБР. Досить мати $\beta_p = 1$, тоді з імовірністю P буде забезпечена безвідмовна робота протягом n_p циклів.

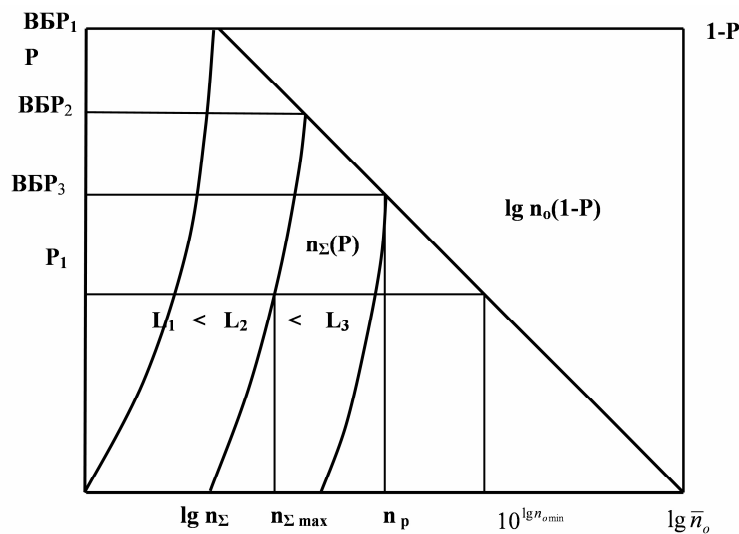


Рисунок 1. Функції розподілу числа циклів напрацювання $n_\Sigma(P)$ і довговічності $\lg n_o(1-P)$, а також схема знаходження показників безпеки

Визначення функції розподілу довговічностей і показників безпеки на прикладі автомотриси АДМ.

При багаторежимному навантаженні необхідно враховувати варіації рівнів навантаження, оскільки вони є складовими середньоквадратичного відхилення СКВ процесу S_a . Для цього слід знайти СКВ об'єднаного процесу руху по прямим і кривих.

$$S_{ac} = \sqrt{0,7[S_{aII}^2 + (\bar{\sigma}_{ac} - \bar{\sigma}_{aII})^2] + 0,25[S_{aK}^2 - (\bar{\sigma}_{ac} - \bar{\sigma}_{aK})^2]}, \quad (2)$$

де $S_{aII} = 8,5 \text{ МПа}$ і $S_{aK} = 17 \text{ МПа}$ відповідно СКВ процесу при русі по прямим і кривих;

$\bar{\sigma}_{aII} = 34 \text{ МПа}$ и $\bar{\sigma}_{aK} = 44 \text{ МПа}$ – медіанне значення тих же процесів;

$\bar{\sigma}_{ac} = 37 \text{ МПа}$ – медіанне значення амплітуди об'єднаного процесу.

Об'єднане СКВ є результатом варіацій рівнів

$$\bar{S}_{ac} = \sqrt{\sum P_i \cdot c_i [S_{ai}^2 + (\sigma_{ai} - \bar{\sigma}_{ac})^2]} \quad (3)$$

Припускаючи СКВ рівнів блоків рівними між собою, тобто $S_{ai} = const$, вносячи її за знак суми, враховуючи, що $\sum P_i \cdot c_i = 1$, отримуємо

$$S_{ai} = \sqrt{S_{ac}^2 - \sum P_i c_i \cdot (\bar{\sigma}_{ai} - \sigma_{ac})^2} = 3,2 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Далі для кожного рівня можна отримати СКВ величини, зворотної елементарному пошкодженню,

$$S_{Ni} = m \cdot \frac{S_{ai}}{\bar{\sigma}_{ai}} \cdot N_i \cdot \alpha, \quad (5)$$

де $m = 11,8$ – показник нахилу кривої втоми;

N_i – довговічність при амплітуді $\bar{\sigma}_{ai}$;

α – поправочний коефіцієнт, що залежить від варіації довговічностей при $N_{\min} : N_{\max} > 1:8 - \alpha = 0,75$.

Шуканий коефіцієнт варіації зовнішнього фактора буде [5]

$$V_y = \frac{\sqrt{\sum c_i^2 \cdot P_i^2 \cdot S_{Ni}^2}}{\sum c_i \cdot P_i \cdot N_i}. \quad (6)$$

В (5) потрібно враховувати тільки ті рівні, які створюють максимальні пошкодження й вони повинні бути одного порядку. У цьому випадку це 5..7 рівнів блока, які в сумі дають 90% пошкодження. Виходячи із цього, $V_y = 0,67$.

Коефіцієнт варіації внутрішнього фактора [5] визначаємо як

$$V_a = 2,3 \cdot S_{\lg N} = 0,83, \quad (7)$$

де – $S_{\lg N}$ визначається для $\lg N = \lg n_o = \lg 1,61 \cdot 10^{10}$.

СКВ логарифма підсумкової довговічності буде

$$S_{\lg n_o} = \frac{\sqrt{V_y^2 + V_a^2}}{2,3} = 0,46. \quad (8)$$

Виходячи з лонгонормальності розподілу підсумкової довговічності, отримуємо

$$\lg n_{op} = \bar{\lg} n_o \pm u_p \cdot S_{\lg n_o} = 9,95 \pm 0,46 \cdot u_p. \quad (9)$$

При аналізі графіків спектральної потужності встановлено, що середнє значення ефективної частоти становить $\bar{f}_e = 2,2 \text{ Гц}$, її СКВ = $0,59 \text{ Гц}$, а коефіцієнт варіації $\nu_f = 0,27$.

Медіанне значення числа циклів наробітку \bar{n}_Σ визначається за (4) шляхом підстановки в неї медіанних значень складових залежно від величини продовженого ресурсу L (табл. 1). Коефіцієнт варіації наробітку обчислюємо за коефіцієнтами варіації середньорічного пробігу $\nu_T = 0,11$ і частоти навантаження ν_f

$$\nu_\Sigma = \sqrt{\nu_T^2 + \nu_f^2} = 0,29. \quad (10)$$

Функція розподілу напрацювання буде

$$n_{\Sigma P} = \bar{n}_\Sigma (1 \pm u_p \cdot \nu_\Sigma). \quad (11)$$

Щоб визначити запаси міцності, необхідно спочатку знайти еквівалентні амплітудні напруги σ_{ar3} . Вони визначаються за кривою втоми, якщо $N = 10^{\bar{\lg} n_o}$. Потім, по цій же кривій втоми для $N = \bar{n}_\Sigma$ обчислюють необхідні амплітуди σ_{ar3} . Тоді

середній запас міцності буде

$$\bar{n}_\sigma = \frac{\sigma_{aR_3}}{\sigma_{a03}}, \quad (12)$$

Таблиця 1. Зміна запасів міцності внаслідок експлуатації

L, років	$\bar{n}_\Sigma \cdot 10^{-7}$, циклів	σ_{a03}	σ_{aR_3}	\bar{n}_σ
10	3,1	100	103	1,63
15	4,7	97	99	1,57
20	6,2	94	96	1,52

Як бачимо з табл. 1, запаси циклічної міцності не дуже помітно змінюються зі збільшенням терміну служби L.

За характером зміни індексів безпеки залежно від терміну продовження експлуатації (табл. 2., рис. 2) можна зробити такі висновки. Якщо ймовірність руйнування мала (ймовірність неруйнування $P = 0,999$), то безпека, що забезпечується, незначно зменшується під час експлуатації. Навпаки, при збільшенні ймовірності руйнування безпека суттєво залежить від терміну служби, найбільш інтенсивно падаючи в перші роки роботи.

Таблиця 2. Індекси безпеки

L, років	P	$n_{\Sigma \max} \cdot 10^{-7}$, циклів	$n_{o \min} \cdot 10^{-8}$, циклів	β_p
20	0,999	11,8	3,4	2,9
	0,99	10,4	7,6	7,3
	0,98	10,0	11	10,9
15	0,999	8,9	3,4	3,4
	0,99	7,9	7,6	9,6
	0,98	7,4	11	14,4
10	0,999	5,9	3,4	5,8
	0,99	5,2	7,6	14,6
	0,98	5,0	1,1	21,9

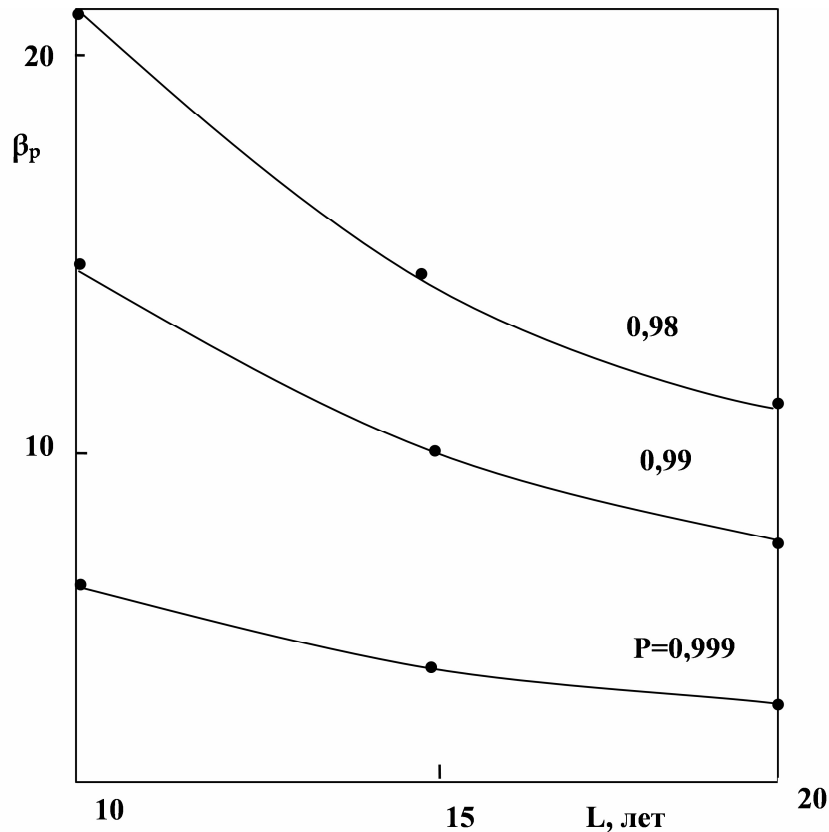


Рисунок 2. Зміна гарантованого запасу довговічності (індексу безпеки) у балках рами при дії основних навантажень

Висновок. Зварені конструкції рами спроектовані на найбільш важкий випадок і це зумовлює низьку ймовірність руйнування, яка фактично і склалася. Тому проведена робота й даний аналіз підтверджують передумови продовження експлуатації, оскільки період інтенсивного зниження індексу безпеки базова конструкція вже відпрацювала. Прогнозовані запаси міцності $n_{\sigma} = 1,52 \dots 1,57$ й індексу безпеки $\beta_p = 3,4 \dots 5,8$ дають підставу припускати надійну роботу рами в наступні 15...20 років за критерієм відмови у вигляді появи тріщин нормального відриву у швелері поздовжніх балок.

Література

1. Деркач Б.А. Выборы вида и режима испытаний при определении остаточного ресурса подвижного состава / Б.А. Деркач, А.Ф. Бойко // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – №27. – С. 232–238.
2. Леонец В.А. Визначення блока напружень, що виникають в рамах візків залізничних локомотивів, з метою оцінки їх залишкового ресурсу / В.А. Леонец, О.А. Леонец, О.Л. Токарев // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – №27. – С. 282–286.
3. Богомаз Г.И. Методы оценки ресурса машин и испытательное оборудование для стендовых испытаний / Г.И. Богомаз, В.Л. Горобец, В.А. Клочко // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – №27. – С. 214–224.
4. Оценка долговечности и остаточного ресурса рам тележек локомотивов / В.Б. Бунин, Э.С. Оганьян, Т.М. Пономарева, В. Г. Шевченко // Деформация и разрушение материалов. – М.: Интерконтакт Наука, 2006. – С. 381–384.
5. Белодеденко С.В. Оценка безопасной долговечности элементов конструкций при проектировании и эксплуатации технологического оборудования // С.В. Белодеденко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – №6. – С. 40–46.

Отримано 10.01.2011