

Ю.Я. Водянніков

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна

Телефон: +38 (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-7128>

П.О. Хозя

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна

Телефон: +38 (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

В.С. Речкалов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна

Телефон: +38 (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-1307>

С.О. Столетов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна

Телефон: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

С.В. Мурчков

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна

Телефон: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1521-0153>

ОЦІНКА РЕСУРСУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ПРИ НЕСИСТЕМАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Одним з актуальних завдань проектування та експлуатації конструкцій інноваційних вантажних вагонів є завдання надійної оцінки їхнього ресурсу, діагностики виробленого та прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації.

На вирішення зазначених завдань спрямовано подану статтю. У статті наведено формули для оцінки довговічності, що враховують закономірність накопичення втомних ушкоджень. Облік накопичення втомних ушкоджень враховується показником ступеня кількості циклів навантаження, який залежить від рівня напружень.

© Водянніков Ю.Я., Хозя П.О., Речкалов В.С., Столетов С.О., Мурчков С.В., 2022 р.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Показано процедуру обробки вихідних даних, отриманих під час проведення динамічних випробувань вантажного вагона, з метою оцінки довговічності та ресурсу конструкції у лінійній постановці.

Як приклад використовується фрагмент осцилограми з 2000 записів, розмаху амплітуд напружень піддаються схематизації за методом повних циклів. Амплітуди напружень розподіляються за класами (інтервалами). Для цілей розрахунку здійснювалася ступінчаста апроксимація емпіричної функції розподілу та будувався варіаційний ряд. За значеннями варіаційного ряду виконувалася перевірка на нормальність розподілу амплітуд напружень шляхом побудови кривої на папері ймовірності. Ступінчаста функція розподілу амплітуд із зазначенням загального числа циклів у блоці є вихідною інформацією про випадкову навантаженість, яка використовується для розрахунку витривалості. Рухомий склад залізниць зазвичай працює в умовах різного поєднання факторів навантаженості, для яких проводяться тензометричні вимірювання навантажень в умовах експлуатації. На основі цих даних складається змішаний блок навантаження, що відображає роботу конструкції у різних умовах "к" з частками q_k . Наведені формули визначення щільності розподілу, середнього значення амплітуди напружень і середнього квадратичного відхилення для змішаного блоку.

Ключові слова: амплітуда, напруження, частота, розмах, клас, крива втоми, пошкодження, щільність, квадратичне відхилення, вірогідність.

Ю.Я. Водянников

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»

ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39621, Украина.

Телефон: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-7128>

П.А. Хозя

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»

ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39621, Украина.

Телефон: +38 (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

В.С. Речкалов

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»

ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39621, Украина. Телефон:

+38 (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-1307>

С.А. Столетов

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»

ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39621, Украина.

Телефон: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

С.В. Мурчков

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»

ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39621, Украина.

Телефон: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1521-0153>

ОЦЕНКА РЕСУРСА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ НЕСИСТЕМАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Одной из актуальных задач проектирования и эксплуатации конструкций инновационных грузовых вагонов является задача надёжной оценки их ресурса, диагностики выработанного и прогноза остаточного ресурса в процессе эксплуатации.

На решение указанных задач направлена представленная статья.

В статье приведены формулы для оценки долговечности, учитывающие закономерность накопления усталостных повреждений. Учет накопления усталостных повреждений учитывается показателем степени для числа циклов нагружения, который зависит от уровня напряжений.

Показана процедура обработки исходных данных, полученных при динамических испытаниях грузового вагона, с целью оценки долговечности и ресурса конструкции в линейной постановке.

В качестве примера используется фрагмент осциллограммы из 2000 записей, размахи амплитуд напряжений подвергаются схематизации по методу полных циклов. Амплитуды напряжений распределяются по классам (интервалам). Для целей расчета осуществлялась ступенчатая аппроксимация эмпирической функции распределения и строился вариационный ряд. По значениям вариационного ряда выполнялась проверка на нормальность распределения амплитуд напряжений путем построения кривой на вероятностной бумаге. Ступенчатая функция распределения амплитуд с указанием общего числа циклов в блоке является исходной информацией о случайной нагруженности, используемой для расчета на выносливость. Подвижной состав железных дорог обычно работает в условиях различного сочетания факторов нагруженности, для которых проводятся тензометрические измерения нагрузок в условиях эксплуатации. На основе этих данных составляется смешанный блок нагружения, отражающий работу конструкции в различных условиях «к» с долями q_k . Приведены формулы для определения плотности распределения, среднего значения амплитуды напряжения и среднего квадратического отклонения для смешанного блока.

Ключевые слова: амплитуда, напряжения, частота, размах, класс, кривая усталости, повреждения, плотность, квадратическое отклонение, вероятность.

Вступ та постановка проблеми.

Більшість деталей машин та конструкцій, зокрема вантажні вагони в процесі експлуатації піддаються впливу змінних у часі навантажень, які є випадковими функціями часу. Якщо рівень змінної напруги перевищує певний рівень, то в матеріалі деталі протікає процес поступового накопичення пошкоджень, що призводить до утворення тріщини, її розвитку та остаточного руйнування деталі. Цей процес називається втомою металу, а відповідне руйнування – втомним.

Тому актуальним є розвиток методів розрахунку динамічної навантаженості елементів машини як складної динамічної системи; оцінки випадкового навантаження елементів із залученням методів теорії випадкових функцій та статистичної динаміки, схематизації випадкових процесів; виявлення експлуатаційних режимів навантаження машини; оцінки опору втоми та втомного ресурсу деталей. Важливість розвитку методів досліджень у цьому напрямі полягає також і в тому, що останнім часом розробляються норми міцності для різних конструкцій, що узагальнюють досвід розрахунку та випробувань несучих систем техніки, накопичений на цей час багатьма дослідниками.

Однак, сучасні ймовірнісні методи розрахунку на міцність при багатоцикловому навантаженні не знайшли достатньо повного відображення для використання в промисловості та, зокрема, в галузі залізничного транспорту.

Перевага ймовірнісних методів порівняно з традиційними методами розрахунку за коефіцієнтами запасу міцності або допустимих напружень полягає в тому, що в них враховуються: реальний випадковий характер зміни експлуатаційних напружень (навантажень); розсіювання показників опору втоми; накопичення втомних ушкоджень при нерегулярному навантаженні.

В результаті ймовірнісних методів розрахунків на втому набувають функції розподілу ресурсу конструкції, що є найважливішою характеристикою її надійності.

Аналіз існуючих досліджень.

Проблемою оцінки втомної міцності, з використанням методів математичної статистики, у різні роки займалися такі видні вчені, як: Афанасьєв Н.М., Волков С.Д., Болотін В.В., Когаєв В.П., Гусєв А.С. та інші, що запропонували свої статистичні теорії втомної міцності.

Афанасьєв Н.М. був одним з перших дослідників, які спробували оцінити втомну міцність, виходячи з її випадкової природи [1]. Теорія Н.М. Афанасьєва зіграла позитивну роль, дозволивши задовільно описати низку закономірностей втоми. Проте ідея про безперервне зростання напружень у «слабких» зернах надалі не підтвердилася експериментально. Крім того, згідно з теорією Афанасьєва, метали, більш чутливі до концентрації напружень, повинні бути менш чутливими до впливу масштабного фактора, проте це також не завжди відповідає експериментальним даним.

Найбільш універсальна статистична теорія була запропонована Волковим С.Д. [2]. Проте, застосування теорії, запропонованої Волковим, ускладнене недостатком у ній різних констант, які визначаються експериментально, що значно обмежує сферу застосування даного підходу.

Болотін В.В. [3] узагальнив і розвинув статистичні теорії міцності стосовно втомного і крихкого руйнування. Ним були отримані рівняння для кривих втоми, що відповідають будь-якій заданій ймовірності руйнування, а також рівняння для середніх значень та стандартних відхилень руйнівного напруження та числа циклів

до руйнування. Болотіним також було запропоновано структурні моделі руйнації, зокрема, модель крихкого руйнування деталі.

Обґрунтування залежності критеріїв втоми від абсолютного розміру деталі, рівня концентрації напружень (оцінюється за відносним градієнтом першого головного напруження) та ймовірності руйнування дана в роботах В.П. Когаєва [4-6] на основі статистичної теорії міцності «слабкої» ланки та розробленої методики визначення параметрів функції розподілу руйнівного напруження. Варто зазначити, що роботи В. П. Когаєва лягли в основу ГОСТ 25.101-83 [7] та ГОСТ 25.504-82 [8]. Методика згідно з ГОСТ 25.504-82 застосовна як мало-, так багатоциклової втоми. Може бути використана як одно-, так багатовісних напружених станів.

Метод розрахунку на втомну міцність, запропонований Гусєвим А.С. [9], заснований на визначенні середнього значення та дисперсії ушкоджуваності деталі за 1 цикл навантаження, за допомогою яких проводиться оцінка ресурсу деталі за умови відомих параметрів навантаження та втомної характеристики матеріалу. При цьому використовується лінійний спосіб накопичення пошкоджень. В основу оцінки витривалості за допомогою статистичних теорій покладено два розрахункові способи: Методика ГОСТ 25.504-82 та методика оцінки витривалості за середньою ушкоджуваністю за цикл.

При досить високих навантаженнях залишкові напруження можуть накопичуватися від циклу до циклу, що в кінцевому рахунку викликає руйнування деталей. Вивченню цих питань присвячені роботи Коффіна та Менсона [10, 11]. Залежність, запропонована Менсоном, дає хорошу відповідність експериментальним даним, проте її застосування вимагає властивостей матеріалів, які можна визначити лише за наявності великого експериментального матеріалу.

У роботі [12] описано підходи до випробувань (як лабораторних, так і чисельних) за різних типів навантаження. Розглянуто метод моделювання випадкових процесів за матрицею частотей. Наведено результати чисельного моделювання, що дозволяють проаналізувати необхідну та достатню довжину процесу для оцінки ресурсу.

У статті [13] представлені методи розрахунку та прогнозування довговічності конструкцій локомотива за їх випадкової змінної навантаженості в експлуатації. В основі методу – лінійна гіпотеза накопичення пошкоджень у матеріалі деталі з урахуванням напружень нижче за межу витривалості, у ймовірнісній та детермінованій постановках. При цьому в першому випадку розрахунок виконується з використанням вторинної кривої втоми, а в другому вона розглядається такою, що складається з двох похилих гілок.

Основні поняття.

В основу оцінки витривалості покладено криві втоми, які представляють графіки залежностей числа циклів до руйнування N від амплітуди діючих напружень σ . Характерною особливістю графіків є наявність асимптоти при $N \rightarrow \infty$, а відповідні їм напруження називаються межею витривалості σ_{-1} . При розрахунках часто використовується умовна межа витривалості, що представляє напруження, за якого зразок матеріалу або елемент конструкції витримує задане число циклів навантаження N_0 .

Криву втоми можна апроксимувати різними способами, проте найпоширенішим є рівняння [2, 3, 4]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$\begin{aligned}\sigma^m \cdot N &= \sigma_{-1}^m \cdot N_0 \quad \text{при } \sigma \geq \sigma_{-1}; \\ N &= \infty \quad \text{при } \sigma < \sigma_{-1},\end{aligned}\tag{1}$$

де m – константа матеріалу.

У логарифмічній системі координат крива втоми перетворюється на пряму, нахилу до осі $\lg N$ під кутом α , що визначається з рівняння (1):

$$\operatorname{ctg} \alpha = m = \frac{\lg N_0 - \lg N}{\lg \sigma - \lg \sigma_{-1}}\tag{2}$$

При оцінці втомної довговічності враховується закономірність накопичення втомних ушкоджень. Закономірності накопичення втомних ушкоджень γ залежать від фізичних властивостей матеріалу і виражаються різними функціями. У загальному випадку ці функції нелінійні і залежать від рівня напружень, які визначаються рівнянням виду [10, 11, 12]:

$$\gamma_n = k(\sigma) \cdot n^{\mu(\sigma)}\tag{3}$$

де n - число циклів навантаження;

γ_n - накопичене ушкодження за n циклів;

σ - напруження;

$\mu(\sigma)$ - коефіцієнт, що залежить від рівня напружень;

$k(\sigma)$ - нормувальний коефіцієнт.

Нормувальний коефіцієнт $k(\sigma)$ визначається за умови, що при руйнівному числі циклів N міра ушкодження $\gamma_N = 1$.

Використовуючи формулу (3), отримаємо:

$$k(\sigma) = N^{-\mu(\sigma)}\tag{4}$$

Припустивши однакову закономірність накопичення ушкоджень при різних рівнях напружень $\mu(\sigma) = \mu = \text{const}$, отримаємо:

$$\gamma_n = \left(\frac{n}{N}\right)^\mu,\tag{5}$$

Експерименти свідчать, що більшість матеріалів $\mu = 0,75 \dots 1,25$ [12]. При $\mu = 1$ рівняння (5) наводиться до лінійної гіпотези накопичення ушкоджень:

$$\gamma_n = \frac{n}{N},\tag{6}$$

Величина одиничного втомного пошкодження γ_0 за один цикл визначається виразом:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

для нелінійного накопичення ушкоджень:

$$\gamma_0 = \frac{\mu(\sigma)}{N^{\mu(\sigma)}} \cdot n^{\mu(\sigma)-1}; \quad (7)$$

для лінійного накопичення ушкоджень:

$$\gamma_0 = \frac{1}{N}.$$

Із співвідношень (7) випливає, що при нелінійному накопиченні пошкоджень втомне ушкодження за один цикл залежить від величини накопиченого втомного ушкодження (від числа накопичених циклів навантаження) і, отже, довговічність залежить від історії навантаження. При лінійному накопиченні пошкоджень довговічність залежить від історії навантаження.

Так, при лінійному законі накопичення втомних ушкоджень при двох, трьох і т.д. рівнях навантаження сумарне пошкодження визначиться за формулою:

$$\gamma_n = \sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i}, \quad (8)$$

де n_i - число циклів навантажень на i -му рівні;

N_i - граничне (руйнівне) число навантажень для i -го рівня напружень;

r – кількість рівнів.

Підсумовування при нелінійному законі накопичення пошкоджень, що складається з k етапів з постійними напругами σ_i і числом циклів n_i , де $i = 1, 2, \dots, k$ визначається за формулами:

Сумарне втомне ушкодження в кінці першого етапу:

$$\gamma_1 = \left(\frac{n_1}{N(\sigma_1)} \right)^{\mu(\sigma_1)} ;$$

Сумарне втомне ушкодження в кінці третього етапу:

$$\gamma_3 = \left\{ \left[\left(\frac{n_1}{N(\sigma_1)} \right)^{\mu(\sigma_1)} + \frac{n_2}{N(\sigma_2)} \right]^{\frac{\mu(\sigma_2)}{\mu(\sigma_3)}} + \frac{n_3}{N(\sigma_3)} \right\}^{\mu(\sigma_3)} ; \quad (9)$$

Якщо навантаження складаються з трьох етапів, то умова руйнування набуде вигляду:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$\left\{ \left[\left(\frac{n_1}{N(\sigma_1)} \right)^{\frac{\mu(\sigma_1)}{\mu(\sigma_2)}} + \frac{n_2}{N(\sigma_2)} \right]^{\frac{\mu(\sigma_2)}{\mu(\sigma_3)}} + \frac{n_3}{N(\sigma_3)} \right\} = 1 ;$$

При довільному числі етапів навантаження умова руйнування запишеться у

$$\text{вигляді: } \left\{ \left[\left[\left(\frac{n_1}{N(\sigma_1)} \right)^{\frac{\mu(\sigma_1)}{\mu(\sigma_2)}} + \frac{n_2}{N(\sigma_2)} \right]^{\frac{\mu(\sigma_2)}{\mu(\sigma_3)}} + \frac{n_3}{N(\sigma_3)} \right]^{\frac{\mu(\sigma_3)}{\mu(\sigma_4)}} + \frac{n_4}{N(\sigma_4)} + \dots + \frac{n_k}{N(\sigma_k)} \right\} = 1 ; \quad (10)$$

Оцінка втоми із застосуванням нелінійної функції накопичення ушкоджень пов'язана зі значними труднощами, тому широке поширення отримала лінійна гіпотеза (див. ф. 6).

Процедура отримання даних для розрахунку довговічності (ресурсу) у лінійній постановці при нерегулярному багатоцикловому навантаженні

Як приклад використовується фрагмент реалізації (рис. 1), що складається з 2000 записів (рис. 2), отриманий під час проведення динамічних випробувань вантажного вагона.

Схематизація процесу здійснюється за методом «повних циклів» [7] (рис. 3), причому розмахи напружень відповідають подвоєній амплітуді (табл. 1).

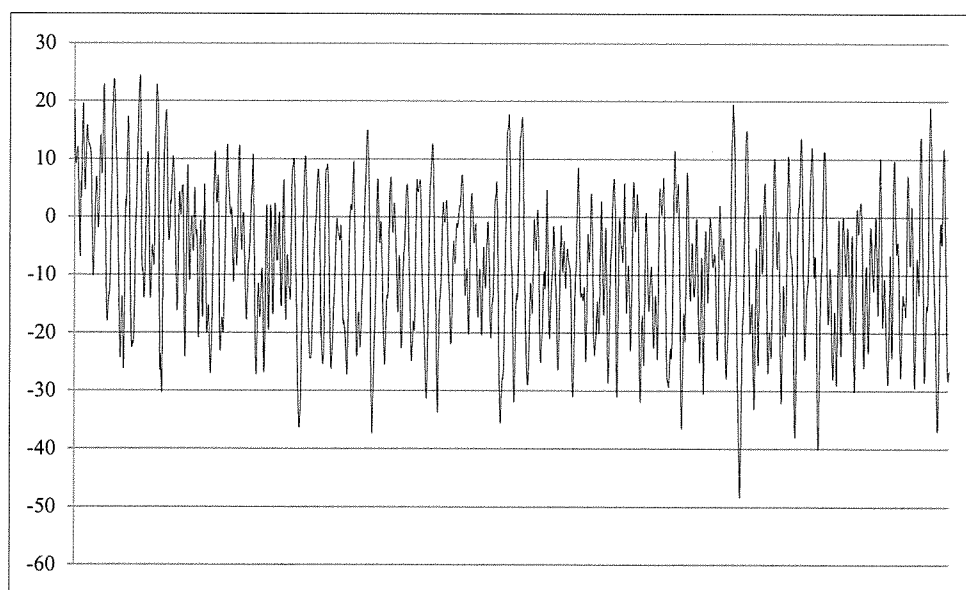


Рис. 1. Осцилограма запису амплітуд напружень

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

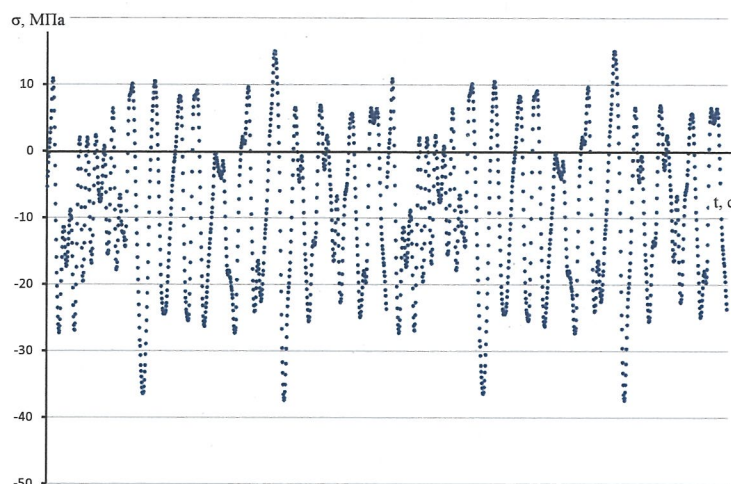


Рис. 2. Фрагмент осцилограми з 2000 записів динамічних напружень під час проведення випробувань вантажного вагона

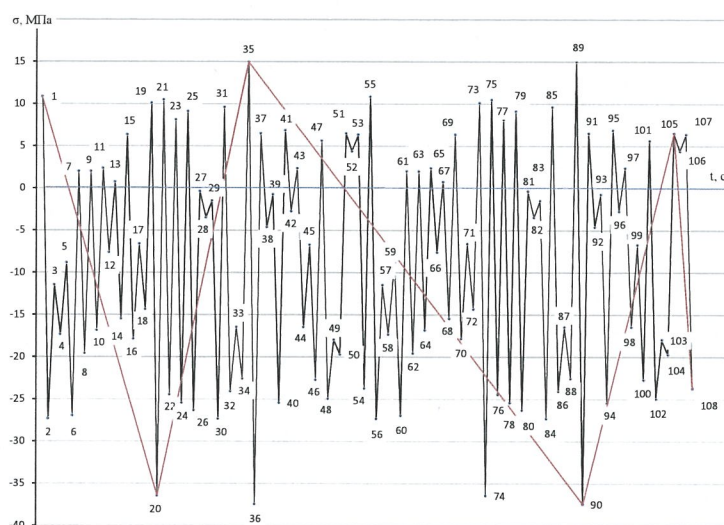


Рис. 3. Приведена осцилограма динамічних напружень методом повних циклів

Амплітуди напружень розподіляються за класами з інтервалом 2 МПа, для кожного інтервалу визначається кількість (частота) амплітуд, що потрапляють в даний інтервал (табл. 2). Оскільки кожен розмах відповідає одному напівциклу напружень, то загальна кількість циклів λ_6 у блоці напружень за час t_6 дорівнюватиме половині числа розмахів: $\lambda_6 = 56/2 = 28$ циклів (див. табл. 1)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. Розмахи напружень шляхом повних циклів

№ п/п	Розмах	$2\sigma_a$, МПа	п/п	Розмах	$2\sigma_a$, МПа	№ п/п	Розмах	$2\sigma_a$, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1-2	38,2	20	79-84	-27,3	39	28-29	2,0
2	5-6	18,1	21	85-86	-24,1	40	33-34	6,1
3	7-8	21,6	22	2-19	10,1	41	38-39	3,9
4	11-14	17,8	23	56-73	10,1	42	42-43	5,1
5	15-16	24,2	24	36-55	10,9	43	44-45	9,7
6	24-25	34,6	25	91-94	-25,4	44	49-50	1,7
7	26-27	25,9	26	100-101	5,6	45	52-53	2,0
8	31-32	33,7	27	95-102	-25,0	46	57-58	5,9
9	37-40	31,9	28	74-89	15,0	47	63-64	18,8
10	46-47	28,3	29	1-20	-36,4	48	66-67	8,4
11	21-30	37,8	30	20-35	15,0	49	71-72	7,7
12	51-54	30,2	31	35-90	-37,4	50	76-77	32,6
13	59-60	18,1	32	90-105	6,5	51	82-83	2,0
14	61-62	21,6	33	105-108	-23,7	52	87-88	6,1
15	65-68	17,8	34	3-4	-17,3	53	92-93	3,9
16	69-70	24,2	35	9-10	-16,8	54	96-97	5,1
17	75-78	35,9	36	12-13	0,7	55	98-99	9,7
18	80-81	25,9	37	18-17	-14,3	56	103-104	1,7
19	41-48	31,8	38	22-23	8,1			

Для побудови функції розподілу амплітуд напружень, отримані розмахи діляться на 2 і розташовуються у порядку, що зростає.

Таблиця 2. Розподіл частот амплітуд напружень за класами

№ класу	Інтервал, МПа	Середина інтервалу, МПа	Частота попадання	№ класа	Інтервал, МПа	Середина інтервалу, МПа	Частота попадання
1	0-2	1	7	8	14-16	15	8
2	2-4	3	8	9	16-18	17	6
3	4-6	5	4	10	18-20	19	5
4	6-8	7	0	11	20-22	21	1
5	8-10	9	6	12	22-24	23	3
6	10-12	11	2	13	24-26	25	1
7	12-14	13	4	14	26-28	27	1

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За даними таблиці 2 будується варіаційний ряд амплітуд напружень (табл. 3), графік якого наведено на рис. 4.

Таблиця 3. Варіаційний ряд амплітуд напружень, отриманий за методом повних циклів

i	σ_a , МПа	Сумма частот, h_i	$P_i = \frac{h_i - 0,5}{n}$	i	σ_a , МПа	Сумма частот, h_i	$P_i = \frac{h_i - 0,5}{n}$
1	1	7	0,1161	8	15	39	0,6875
2	3	15	0,2589	9	17	45	0,7946
3	5	19	0,3304	10	19	50	0,8839
4	7	19	0,3304	11	21	51	0,9018
5	9	25	0,4375	12	23	54	0,9554
6	11	27	0,4732	13	25	55	0,9732
7	13	31	0,5446	14	27	56	0,9911

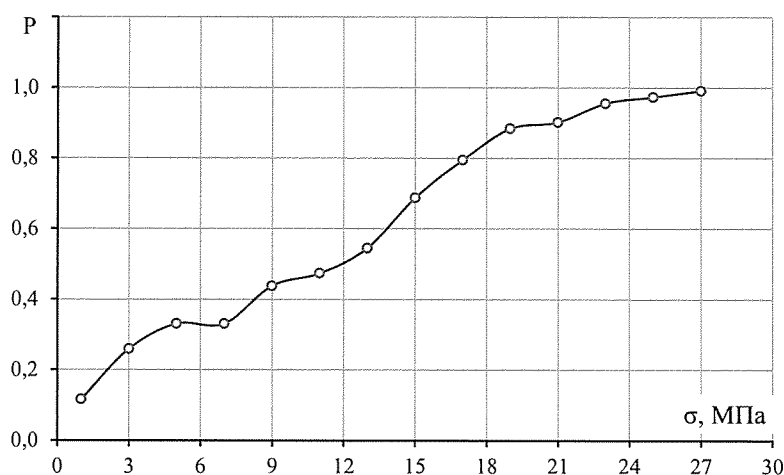


Рис. 4. Емпірична функція розподілу амплітуд напружень

За отриманими ймовірностями таблиці 3 визначаються квантілі розподілу і будується крива (рис. 5), яка свідчить про близькість емпіричного розподілу нормального закону (пряма лінія).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

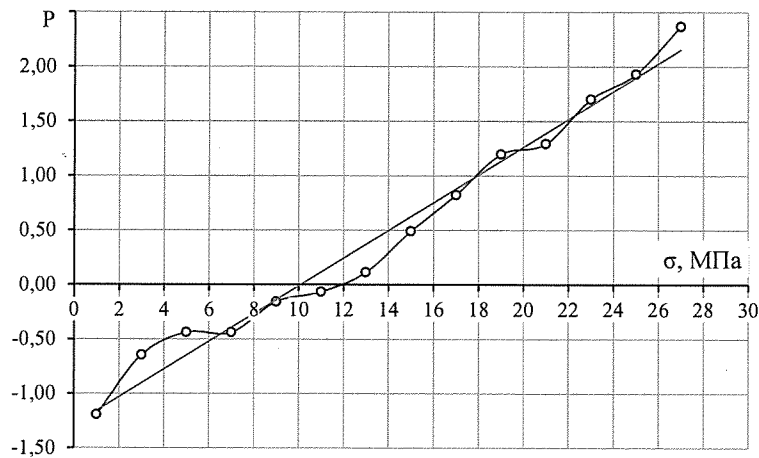


Рис. 5. Емпірична функція розподілу амплітуд напружень на нормальному ймовірнісному папері

Для цілей розрахунку здійснюється ступінчаста апроксимація емпіричної функції розподілу амплітуд напружень (табл. 4) з урахуванням функції розподілу амплітуд напружень, наведеної на рис. 4.

Таблиця 4. Ступінчаста апроксимація емпіричної функції розподілу амплітуд напружень

i	σ_{ai} , МПа	P_i	Інтервал σ_{ai} , МПа	Середина інтервалу σ_{ai} , МПа	$\Delta P_i^{(k)} (P_i - P_{i-1})$	λ_{i6}	$\sigma_{ai} / \sigma_{amax}$
1	2	0,1161	0-2	1	0,1161	7	0,0370
2	4	0,2589	2-4	3	0,1429	8	0,1111
3	6	0,3304	4-6	5	0,0714	4	0,1852
4	8	0,3304	6-8	7	0,0000	0	0,2593
5	10	0,4375	8-10	9	0,1071	6	0,3333
6	12	0,4732	10-12	11	0,0357	2	0,4074
7	14	0,5446	12-14	13	0,0714	4	0,4815
8	16	0,6875	14-16	15	0,1429	8	0,5556
9	18	0,7946	16-18	17	0,1071	6	0,6296
10	20	0,8839	18-20	19	0,0893	5	0,7037
11	22	0,9018	20-22	21	0,0179	1	0,7778
12	24	0,9554	22-24	23	0,0536	3	0,8519
13	26	0,9732	24-26	25	0,0179	1	0,9259
14	28	0,9911	26-28	27	0,0179	1	1,0000

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Ступінчаста функція розподілу амплітуд із зазначенням загального числа циклів у блоці λ_σ є вихідною інформацією про випадкову навантаженість, яка використовується для розрахунку на витривалість, причому закон розподілу зручно представляти у відносних величинах $\sigma_{ak}/\sigma_{amax}$.

Рухомий склад залізниць зазвичай працює в умовах, у яких рівень навантаженості буває різним. Тому вводяться фактори, що регламентуються, при різних поєднаннях яких проводяться тензометричні вимірювання навантажень в умовах експлуатації.

Із умов експлуатації шляхом обробки статистичної інформації визначаються очікувані відносні частки p_i роботи вагона в умовах "к" за термін служби. На основі цих даних складається змішаний блок навантаження, що відображає роботу конструкції у різних умовах "к" з частками q_k . Очевидно, має бути:

$$\sum_{k=1}^r q_k = 1 \quad (r - \text{кількість рівнів навантажень})$$

Щільність розподілу змішаного закону $f(\sigma_a)$, середнє значення $\bar{\sigma}_a$ та середнє квадратичне відхилення змішаного закону $S_{\sigma_a}^2$ визначаються за формулами [13, 16]:

$$f(\sigma_a) = \sum_k q_k \cdot f_k(\sigma_a) \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_a = \sum_k q_k \cdot \bar{\sigma}_{ak} \quad (12)$$

$$S_{\sigma_a}^2 = \sum_k q_k \cdot \sigma_{ak}^2 \cdot (1 + \nu_k^2) - \bar{\sigma}_a^2 = \sum_k q_k \cdot [S_{\sigma_{ak}}^2 \cdot (\bar{\sigma}_{ak} - \bar{\sigma}_a)^2] \quad (13)$$

$$\nu_k = \frac{S_{\sigma_{ak}}^2}{\bar{\sigma}_{ak}^2} \quad (14)$$

де $\bar{\sigma}_{ak}$ та $S_{\sigma_{ak}}^2$ - середнє значення та середнє квадратичне відхилення амплітуди σ_{ak} для k -го навантаження;

ν_k - коефіцієнт варіації σ_{ak} .

Число циклів у блоці навантаження також приймається залежним від "к". Число циклів у змішаному блоці обчислюється за формулою:

$$\lambda_\sigma = \sum_k \lambda_{\sigma_k} \cdot q_k \quad (15)$$

Якщо функція розподілу амплітуд для умов "к" задані у вигляді таблиці 4, тоді ступінчаста функція розподілу амплітуд змішаного блоку визначається виразом: $\Delta P_i = \sum_{k=1}^r q_k \cdot \Delta P_{ik}$, де ΔP_{ik} - значення $\Delta P_i^{(k)}$ для умов "к" (см. табл. 4).

При цьому, розбиття на інтервали по σ_{ak} повинно бути однаковим для всіх "к". Зазначена процедура утворення змішаного блоку навантаження дозволяє врахувати вплив регламентуючих факторів на рівень навантаженості.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Статистичні характеристики при максимальних значеннях амплітуд навантаження визначаються за формулами [13, 16]:

$$\bar{\sigma}_{a,\max} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{r=1}^m \sigma_{a,\max}^{(r)}; \quad (16)$$

$$S_{\sigma_{a,\max}} = \sqrt{\frac{1}{1-m} \cdot \sum_{r=1}^m (\sigma_{a,\max}^{(r)} - \bar{\sigma}_{a,\max})^2} \quad (17)$$

$$v_{\sigma_{a,\max}} = \frac{S_{\sigma_{a,\max}}}{\bar{\sigma}_{a,\max}} \quad (18)$$

де m – число повторних дослідів щодо оцінки функції розподілу змішаного блоку навантаження; досліді показують, що розподіл величин $\sigma_{\sigma_{a,\max}}^{(r)}$ і $\sigma_{\sigma_{ai}}^{(r)}$ може бути прийнято нормальним, причому $v_{\sigma_{a,\max}} = v_{\sigma_{ai}} = v_{\epsilon}$, а значення випадкових величин $\sigma_{\sigma_{a,\max}}$ і $\sigma_{\sigma_{ai}}$ відповідні заданої ймовірності P можна обчислити за формулами [13]:

$$\sigma_{a,\max} = \bar{\sigma}_{a,\max} \cdot (1 + u_p \cdot v_{\epsilon}); \quad (19)$$

$$\sigma_{ai} = \bar{\sigma}_{ai} \cdot (1 + u_p \cdot v_{\epsilon}); \quad (20)$$

де $\bar{\sigma}_{ai}$ - середнє значення величини σ_{ai} ;

u_p - квантиль нормального закону розподілу, що відповідає ймовірності P .

Значення $\bar{\sigma}_{ai}$ визначається за формулою, аналогічною (16)

$$\bar{\sigma}_{ai} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{r=1}^m \sigma_{ai}^{(r)}; \quad (21)$$

Вихідною інформацією про навантаження конструкції, необхідної для розрахунку на витривалість, є: таблиця пар чисел $(\sigma_{ai} / \sigma_{a,\max}, \Delta P_i)$ для $i=1, 2, \dots, n$ (форма змішаного закону розподілу амплітуд), величина $\bar{\sigma}_{a,\max}$, коефіцієнт варіації v_{ϵ} і число циклів у змішаному блоці навантаження λ_{σ} .

Регламентовані фактори навантаження вантажного вагона, при різних поєднаннях яких проводяться тензометричні вимірювання напружень в умовах експлуатації.

Необхідний масив експериментальної інформації з досліджуваних величин при

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ходових випробуваннях міцності вантажного вагона отримують шляхом послідовного набору записів (реалізацій) процесів при різних швидкостях і режимах руху дослідного поїзда на характерних заздалегідь обраних (намічених) ділянках залізничної колії.

Кількість циклів n_k амплітуд динамічних напружень визначають за формулою [17]:

$$n_k = T_p \cdot \rho_{yч,l} \cdot \rho_{v,l,k} \cdot f_{э,l,k} \cdot \lambda_{б,l,k} \quad (22)$$

де l - лічильник номерів ділянок;

$\rho_{yч,l}$ - можливість реалізації ділянки шляху, приймають 0,65 для прямих ділянок шляху, 0,20 для кривих великих радіусів, 0,15 для кривих малих радіусів;

$\rho_{v,l,k}$ - ймовірність реалізації значення швидкості рівня на ділянці шляху з номером l ;

$f_{э,l,k}$ - частота зміни динамічних напружень при русі зі швидкістю рівня до ділянки шляху з номером l , Гц;

$\lambda_{б,l,k}$ - число циклів у блоці навантаження при русі зі швидкістю рівня на ділянці шляху з номером l ;

T_p - сумарний час дії динамічних напружень за розрахунковий термін служби визначається за формулою:

$$T_p = T_k \cdot \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \quad (23)$$

де \bar{L} - проектний середньодобовий пробіг вагона, м/добу;

\bar{V} - середня технічна швидкість руху вагона, м/с, приймають за таблицею 5;

T_k - розрахунковий ресурс (призначений календарний термін служби вагона), виражений на добу.

Таблиця 5. Середня технічна швидкість руху для різних значень конструкційної швидкості вагона в кілометрах на годину [17]

Конструкційна швидкість, км/год	Середня технічна швидкість, км/год	Конструкційна швидкість, км/год	Середня технічна швидкість, км/год
200	112	120	81
160	92	100	69
140	89	90	61

Вимірювання динамічних напружень в елементах конструкції вагона при проведенні ходових міцносних випробувань проводяться зі швидкостями [17]:

- на прямій ділянці колії – 20, 40, 60, 80, 100, 120 км/год;

- на кривій R300 - 10, 20, 40, 60 км / год;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

-на кривій R700 - 20, 40, 60, 80, 100, 110 км / год;

-на стрілочному переводі марки 1/11 – 10, 20, 30, 40 км/год.

Динамічні сили (динамічні напруження), що діють на конструкцію кузова вагона при русі, і частоту їх зміни визначають з урахуванням розподілу швидкостей руху, наведеного в таблиці 6.

Таблиця 6. Розподіл швидкостей руху для визначення опору втомі вагона згідно з технічною документацією [17]

Інтервал швидкості руху, м/с	Середня швидкість інтервалу, м/с	Ймовірність руху в діапазоні швидкості для вагона з конструкційною швидкістю, м/с (км/год)				
		44,4 (160)	38,9 (140)	33,3 (120)	27,8 (100)	25,0 (90)
від 0,00 до 12,5	6,25	0,02	0,02	0,03	0,05	0,15
понад 12,5 до 15,0	13,75	0,05	0,06	0,07	0,12	0,30
понад 15,0 до 17,5	16,25	0,07	0,07	0,10	0,30	0,35
понад 17,5 до 20,0	18,75	0,09	0,10	0,18	0,20	0,13
понад 20,0 до 22,5	21,25	0,11	0,15	0,15	0,15	0,05
понад 22,5 до 25,0	23,75	0,13	0,15	0,15	0,10	0,02
понад 25,0 до 27,5	26,25	0,15	0,15	0,15	0,06	-
понад 27,5 до 30,0	28,75	0,13	0,10	0,09	0,02	-
понад 30,0 до 32,5	31,25	0,09	0,08	0,06	-	-
понад 32,5 до 35,0	33,75	0,06	0,05	0,02	-	-
понад 35,0 до 37,5	36,25	0,04	0,05	-	-	-
понад 37,5 до 40,0	38,75	0,03	0,02	-	-	-
понад 40,0 до 42,5	41,25	0,02	-	-	-	-
понад 42,5 до 45,0	43,75	0,01	-	-	-	-
понад 45,0 до 47,5	46,25	-	-	-	-	-
понад 47,5 до 50,0	48,75	-	-	-	-	-
понад 50,0 до 52,5	51,25	-	-	-	-	-
понад 52,5 до 55,0	53,75	-	-	-	-	-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Межа витривалості за амплітудою $\sigma_{a,N}$, МПа, для зварних складових частин не-
сних конструкцій визначається розрахунковим способом за формулою [17]:

$$\sigma_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_M}{k_\sigma} \quad (24)$$

де $\bar{\sigma}_M$ - значення межі витривалості базового матеріалу при базовому числі
циклів $N_0 = 10^7$ і односторонньої довірчої ймовірності 95% приймається
 $\bar{\sigma}_M = 47$ МПа для сталі;

k_σ - коефіцієнт зниження межі витривалості, що визначається для різних типів
зварних з'єднань за таблицею 10 [17].

Слід зазначити, що визначення довговічності (ресурсу) вантажного вагона
тільки при впливі динамічних навантажень недостатньо, тому що на його
конструкцію спільно з динамічними діють поздовжні сили.

Оскільки обсяг статті обмежений редакційними вимогами, її продовження буде
опубліковано у наступному випуску збірника наукових праць.

ЛІТЕРАТУРА

1. Афанасьев Н. Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов. 1953. Киев, Изд-во АН УССР, 123 с.
2. Волков С. Д. Статистическая теория прочности. 1960. М.: Машгиз, 176 с.
3. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. 1990. М.: Машиностроение. 448 с.
4. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. 1977. М.: Машиностроение, 232 с.
5. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
6. Когаев В. П., Махутов М. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин на прочность в машиностроении. М.: Машиностроение, 1985. 233 с.
7. ГОСТ 25.101-83, Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. М. Государственный комитет СССР по стандартам. 1984. 25 с.
8. ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М. Государственный комитет СССР по стандартам. 1982. 132 с.
9. Гусев А. С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. М.: Машиностроение, 1989. 248 с.
10. Coffin L.F. A study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, Trans, American Society of Mechanical Engineers, Vol 76, 1954. 931-950 p.
11. Manson S.S. Fatigue and durability of metals at high temperatures, ASMInternational, 2009. 265с.
12. Гусев А.С. Расчет конструкций при случайных воздействиях. А.С. Гусев, В.А. Светлицкий: М., «Машиностроение», 1984, 240 с.
13. Когаев В.П. Расчет деталей машин на прочность при многоцикловом нагружении. М: Машиностроение, 1985, 64 с.
14. Гадолина. И.В. Лабораторный и численный эксперимент при случайном нагружении как альтернатива испытаниям при регулярном нагружении (Труды конференции - Москва, 26-28 октября 2016 года). И.В.Гадолина, А.А.Монахова, И.М.Петрова, И.Л.Серебрякова. М: Изд-во ИМАШ РАН. 2016. 4-7 с.

15. Коссов В. С. Методы определения ресурса конструкций локомотивов (Труды конференции - Москва, 26-28 октября 2016 года). Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, А. С. Гасюк, Н. Ф. Красюков, А. Л. Протопопов. М.: Издво ИМАШ РАН. 2016. 76-81 с.

16. Когаев В.П. Статистические характеристики сопротивления усталости и расчет на прочность деталей машин. В кн.: Совершенствование расчетов прочности и надежности машин на основе статистических методов. М.: «Машиностроение», 1972, 10-28 с.

17. ГОСТ 33211-2014. Межгосударственный стандарт. ВАГОНЫ ГРУЗОВЫЕ. Требования к прочности и динамическим качествам. – М.: Издание официальное, Стандартинформ, 2016. 54 с.

18. Хан. Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М. Мир, 1969. 395 с.

19. Когаев В.П. Расчетная оценка пределов выносливости деталей машин. Вестник машиностроения, 1972, № 1, С. 11-14.

20. Москвитин Г.В., Лебединский С.Г. Закономерности развития усталостных трещин в стали литых деталей железнодорожных конструкций. Проблемы машиностроения и надежности машин. №5. 2016. С. 51-54.

21. Махутов Н.А., Петрова И.М., Гадолина И.В. Использование результатов испытаний при нерегулярном нагружении для определения параметров модифицированной кривой усталости. Заводская лаборатория. №4. 2011. С. 46-50.

22. Махутов Н.А., Гапанович В.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Красюков Н.Ф., Волохов Г.М. Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов. ТРАНСПОРТ: Наука, техника, управление. ВИНТИ РАН. Москва, 2016. № 10. С. 3 – 12.

Yu.Ya. Vodiannikov

State Enterprise "Ukrainian Research Railway Car Bulding Institute "

33 I. Prikhodka Str, Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-7128>

P.O. Khozia

State Enterprise "Ukrainian Research Railway Car Bulding Institute "

33 I. Prikhodka Str, Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

V.S. Rechkalov

State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Bulding Research Institute"

33 I. Prikhodka Str., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine

tel.: (05366) 6-20-43

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-1307>

S.A. Stolietov

State Enterprise "Ukrainian Research Railway Car Bulding Institute "

33 I. Prikhodka Str, Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

S.V. Murchkov

State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Bulding Research Institute"

33 I. Prikhodka Str., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine

tel.: (05366) 6-20-43

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1521-0153>

ESTIMATION OF FREIGHT CARS SERVICE LIFE UNDER NON-SYSTEMIC LOADING IN OPERATION

One of the urgent tasks of designing and operating the structures of innovative freight cars is the reliable assessment of their service lifetime, diagnostics of the produced and forecast of the residual service life under operation.

The presented article is aimed at solving these problems. The article presents formulas for estimating durability, taking into account the pattern of fatigue damage accumulation. Recording of fatigue damage accumulation is determined by the degree of the loading cycle number, which depends on the stress level.

The procedure for initial data processing obtained during the dynamic tests of a freight car is shown in order to assess the durability and lifetime of the structure in a linear setting. As an example, a fragment of an oscillogram of 2000 thousand records is used, the voltage amplitudes are schematized by the method of complete cycles. Stress amplitudes are divided into classes (intervals). For calculation purposes, a stepwise approximation of the empirical distribution function was performed and a variational series was generated. The values of the variational series were used to check the normality of the distribution of stress amplitudes by plotting a curve on a probabilistic paper. The stepwise amplitude distribution function indicating the total number of cycles in the block is the input of the random loading used to calculate the endurance. Railway rolling stock usually operates under conditions of various loading factors combinations, for which tensometric measurements of loads are carried out under operating conditions. Based on these data, a mixed load block is compiled, which reflects the operation of the structure in various conditions "k" with fractions q_k . Formulas are given for determining the distribution density, the average value of the voltage amplitude and the standard deviation for a mixed block.

Key words: amplitude, stresses, frequency, range, class, mixed block, fatigue curve, damage, density, standard deviation, mean, probability.

REFERENCES

1. Afanasev, N. N. (1953). *Statisticheskaya teoriya ustalostnoj prochnosti metallov* [Statistical theory of fatigue strength of metals]. Kiev: Izdatelstvo AN USSR [in Russian]
2. Volkov, S. D. (1960). *Statisticheskaya teoriya prochnosti* [Statistical theory of strength]. Moscow: Mashgiz [in Russian].
3. Bolotin, V. V. (1990). *Resurs mashin i konstrukcij* [Service lifetime of machines and constructions]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
4. Kogaev, V. P. (1977). *Raschety na prochnost' pri napryazheniyah, peremennyh vo vremeni* [Calculations for strength at stresses variable in time]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
5. Kogaev, V. P., & Drozdov Iu. N. (1991). *Prochnost i iznosostojkost detalej mashin*. [Strength and wear resistance of machine parts]. Moscow: Vysshaya Shkola [in Russian]
6. Kogaev, V. P., Makhutov M. A., & Gusenkov A. P. (1985). *Raschety detalej mashin na prochnost v mashinostroenii* [Calculations of machine parts for strength in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian]
7. Metody skhematizacii sluchajnyh processov nagruzheniya elementov mashin i konstrukcij i statisticheskogo predstavleniya rezultatov [Methods for schematization of stochastic processes of loading machine and structure elements and statistical presentation of results] (1983). *GOST 25.101-83*. [in Russian]
8. Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody rascheta harakteristik soprotivleniya ustalosti [Calculations and strength tests. Methods for calculating the characteristics of fatigue resistance] (1982). *GOST 25.504-82* [in Russian]

9. Gusev, A. S. (1989). *Soprotivlenie ustalosti i zhivuchest konstrukcij pri sluchajnyh nagruzkah* [Resistance to fatigue and survival of structures under random loads]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian]
10. Coffin, L.F. (1954). A study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal. *Trans. American Society of Mechanical Engineers*, Vol 76., 931-950 [in Russian]
11. Manson, S.S. (2009). Fatigue and durability of metals at high temperatures, *ASM International*.
12. Gusev, A.S., & Svetlitskii V.A. (1984). *Raschet konstrukcij pri sluchajnyh vozdeystviyah* [Calculation of structures under random influences]. Moscow, Mashinostroenie [in Russian]
13. Kogaev, V.P. (1985). *Raschet detalej mashin na prochnost pri mnogociklovom nagruzenii* [Calculation of machine parts for strength under high-cycle loading]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian]
14. Gadolina I.V., Monakhova A. A., Petrova I.M., & Serebriakova I. L. (2016). Laboratornyj i chislennyj eksperiment pri sluchajnom nagruzenii kak alternativa ispytaniyam pri reguljarnom nagruzenii [Laboratory and numeral experiment at a casual loadening as an alternative to the tests at a regular loadening]. *Proceedings from Conference - Moscow, Oktober 26-28, 2016*. Moscow: Izdatelstvo IMASH RAN [in Russian]
15. Kossov, V. S., Oganian E. S., Volokhov G. M., Gasiuk A. S., Krasiukov N. F., & Protopopov A. L. (2016). Methods of determination of lifetime for locomotives structures [Metody opredeleniya resursa konstrukcij lokomotivov]. *Proceedings from Conference - Moscow, Oktober 26-28, 2016*. Moscow: Izdatelstvo IMASH RAN [in Russian]
16. Kogaev, V.P. (1972). *Statisticheskie harakteristiki soprotivleniya ustalosti i raschet na prochnost detalej mashin* [Statistical characteristics of fatigue resistance and strength calculation of machine parts]. Sovershenstvovanie raschetov prochnosti i nadezhnosti mashin na osnove statisticheskikh metodov - Improving calculations of strength and reliability of machines based on statistical methods (pp. 10-28). Moscow: Mashinostroenie [in Russian]
17. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities]. (2016). *GOST 33211-2014*. Moscow: Standartinform [in Russian]
18. Khan, G., & Shapiro S. (1969). *Statisticheskie modeli v inzhenernyh zadachah* [Statistical models in engineering tasks]. Moscow: Mir
19. Kogaev, V.P. (1972). Raschetnaya ocenka predelov vynoslivosti detalej mashin [Estimated assessment of endurance limits of machine parts]. *Vestnik mashinostroeniya - Bulletin of mechanical engineering*, 1, 11-14 [in Russian]
20. Moskvitin, G.V., & Lebedinskij, S.G. (2016). Zakonomernosti razvitiya ustalostnyh treshchin v stali lityh detalej zheleznodorozhnyh konstrukcij [Patterns of development of fatigue cracks in the steel of cast parts of railway structures]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin - Problems of mechanical engineering and reliability of machines*, 5, 51-54 [in Russian]
21. Makhutov, N.A., Petrova, I.M., & Gadolina, I.V. (2011). Ispolzovanie rezultatov ispytaniy pri ne-reguljarnom nagruzenii dlya opredeleniya parametrov modifitsirovannoj krivoj ustalosti [Use of test results under non-regular loading to determine the parameters of the modified fatigue curve]. *Zavodskaya laboratoriya - Factory laboratory*, 4, 46-50 [in Russian]
22. Makhutov, N.A., Gapanovich, V.A., Kossov, V.S., Oganyan, E.S., Krasnyukov, N.F., & Volohov, G.M. (2016). Metody opredeleniya resursa i ciklicheskoj prochnosti konstrukcij ekipazhnoj chasti lokomotivov. [Methods for determining the service lifetime and cyclic strength of the undercarriage structures of the locomotives]. *TRANSPORT: Nauka, tekhnika, upravlenie - TRANSPORT: Science, technique, management*, 10. 3 – 12. Moscow: VINITI RAN [in Russian].