

О.В. Орлов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

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

Телефон: (05366) 6-13-24, E-mail: oleh.orlov81@gmail.com

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-1555-0297>

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

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

Телефон: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ДОВГОБАЗНИХ ВАГОНІВ-ПЛАТФОРМ

В цій статті проаналізовано результати досліджень науковців останнього періоду в напрямку підвищення міцносних якостей довгобазних вагонів-платформ. З'ясовано, що питання комплексного аналізу визначення втомної міцності довгобазних вагонів-платформ різними методами, які ґрунтуються на проведенні експериментальних досліджень, в зазначених дослідженнях не розглядалось. Тому, в роботі запропоновано зосередитись на цьому актуальному питанні.

Встановлено місце зародження та розвитку тріщини в рамі довгобазного вагона-платформи за результатами проведення ресурсних циклічних випробувань на втому. Визначено коефіцієнт запасу опору втоми конструкції рами довгобазного вагона-платформи за результатами різних методів оцінки: експериментально-розрахунковим методом з використанням даних статичних випробувань, ходових міцносних випробувань, ресурсних циклічних випробувань на втому (для двох випадків експлуатаційного навантаження - за результатами ходових міцносних випробувань та за результатами скидання з клинів). Доведено необхідність застосування комплексного підходу під час оцінки такого важливого показника як коефіцієнт запасу опору втоми довгобазного вагона-платформи через розбіжність даних, отриманих різними експериментально-розрахунковими методами. Підтверджено необхідність експериментального обґрунтування конструктивних рішень рами довгобазних вагонів-платформ та оцінки точності теоретичних розрахунків шляхом проведення ресурсних циклічних випробувань на втому. Подальші дослідження необхідно зосередити на удосконалення існуючих та розроблення нових методів оцінки опору втоми рам довгобазних вагонів-платформ як на стадії проектування, так і на стадії обробки даних експериментальних досліджень.

© Орлов О.В., Сулим А.О., 2022

Ключові слова: довгобазний вагон-платформа, коефіцієнт запасу опору втомі, метод оцінки, ресурсні циклічні випробування, ходові міцносні випробування.

О.В. Орлов

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина

Телефон: (05366) 6-13-24, E-mail: oleh.orlov81@gmail.com

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-1555-0297>

А.А. Сулим

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина

Телефон: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛИННОБАЗНЫХ ВАГОНОВ-ПЛАТФОРМ

В этой статье проанализированы результаты исследований ученых последнего периода в направлении повышения прочностных качеств длиннобазных вагонов-платформ. Выяснено, что вопрос комплексного анализа определения усталостной прочности длиннобазных вагонов-платформ различными методами, основанными на проведении экспериментальных исследований, в указанных исследованиях не рассматривался. Поэтому в работе предложено сосредоточиться на этом актуальном вопросе.

Установлено место зарождения и развития трещины в раме длиннобазного вагона-платформы по результатам проведения ресурсных циклических испытаний на усталость. Определен коэффициент запаса сопротивления усталости конструкции рамы длиннобазного вагона-платформы по результатам различных методов оценки: экспериментально-расчетным методом с использованием данных статических испытаний, ходовых прочностных испытаний, ресурсных циклических испытаний на усталость (для двух случаев эксплуатационной нагрузки - по результатам ходовых прочностных и по результатам сброса с клиньев). Доказана необходимость применения комплексного подхода при оценке такого важного показателя как коэффициент запаса сопротивления усталости длиннобазного вагона-платформы из-за расхождения данных, полученных разными экспериментально-расчетными методами. Подтверждена необходимость экспериментального обоснования конструктивных решений рамы длиннобазных вагонов-платформ и оценки точности теоретических расчетов путем проведения ресурсных циклических испытаний на усталость. Дальнейшие исследования необходимо сосредоточить на усовершенствовании существующих и разработке новых методов оценки сопротивления усталости рам длиннобазных вагонов-платформ как на стадии проектирования, так и на

стадії обробки даних експериментальних досліджень.

Ключевые слова: длиннобазный вагон-платформа, коэффициент запаса сопротивления усталости, метод оценки, ресурсные циклические испытания, ходовые прочностные испытания.

Вступ. На цей час розроблено та введено в експлуатацію достатню кількість нових та модифікованих моделей довгобазних вагонів-платформ, основною відмінністю яких є збільшена довжина по осям автозчепів (не менше 25 м) та збільшена до 20 м база. Основною особливістю довгобазних вагонів-платформ є можливість одночасного перевезення двох 40-футових контейнерів або чотирьох 20-футових контейнерів або будь-яких допустимих комбінацій 40- і 20-футових контейнерів.

Постановка проблеми. Конструкції даних вагонів проектувались, розраховувались у відповідності до діючих нормативних документів [1–4]. За результатами експериментальних досліджень та експлуатації довгобазних вагонів-платформ було виявлено цілу низку істотних недоліків у їх конструкції, пов'язаних з недостатньою міцністю рами. У ході випробувань довгобазних вагонів-платформ встановлено, що руйнування відбувалися в основному в зоні зварних швів, що є концентраторами напружень, або в металі, через відсутність оптимальної форми сполучення несучих елементів [5]. Факт наявності втомних тріщин ставить під сумнів можливість стандартних розрахункових методів оцінки опору втомі довгобазних вагонів-платформ та вимагає експериментального підтвердження конструктивно закладених параметрів міцності в умовах максимально наближених до експлуатаційних.

Аналіз останніх досліджень. На даний час питанням втомної міцності довгобазних вагонів-платформ приділяється достатньо багато уваги. Цей факт в черговий раз підтверджує актуальність та необхідність вирішення питання удосконалення конструкції довгобазних вагонів-платформ з метою підвищення ресурсу. До основних досліджень в напрямку підвищення міцносних якостей довгобазних вагонів-платформ слід віднести роботи Кельріха М.Б., Донченка А.В., Гуржи Н.Л., Федосова-Ніконова Д.В., Фоміна О.В., Ловської А.О., Чепурного А.Д., Шатунова О.В. [5–13] та інших.

В статті [5] розглянуто існуючі конструктивні рішення довгобазних вагонів-платформ та проаналізовано результати експериментальних досліджень міцносних характеристик цих вагонів.

В роботі [6] запропоновано розрахунок на міцність несучої конструкції довгобазної вагона-платформи. До уваги прийнято два варіанти завантаження вагона-платформи, за яких отримано найбільші згинальні моменти у несучій конструкції.

Питання щодо можливості застосування методів теоретичних і експериментальних досліджень міцності основних несучих елементів конструкцій довгобазних вагонів-платформ розглянуті у публікації [7]. У роботі висвітлено результати розрахунку складових елементів конструкції на втому з використанням обчислювального комплексу, що реалізує метод скінченних елементів стандарту IBM-PC.

Особливості проведення ходових міцносних та динамічних випробувань вагона-платформи наведені у роботі [8]. Визначено основні показники міцносних та динамічних якостей вагона-платформи за умови його завантаження 20-ти та 40-футовими контейнерами.

Питання підвищення ефективності експлуатації довгобазної вагона-платформи висвітлено у публікації [9]. В цій роботі проведено розрахунок динамічної наван-

таженості та міцності несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованої модернізації.

Дослідження основних характеристик міцності довгобазної несучої конструкції вагона-платформи проводиться у роботі [10]. Визначено найбільш навантажені елементи рами вагона-платформи та їх відповідність вимогам безпечної експлуатації.

Дослідження вертикальної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зі зміщеним центром ваги проводиться у роботі [11]. Визначено прискорення, які діють на вагон, а також запропоновано заходи щодо покращення безпеки руху вагона.

Покращення міцносних якостей довгобазної вагона-платформи шляхом удосконалення їх конструкції та методів розрахунків розглянуто в роботах [12, 13].

Разом з тим, питання комплексного аналізу визначення втомної міцності довгобазної вагон-платформи різними методами, які ґрунтуються на проведенні експериментальних досліджень, в зазначених роботах не розглядалось. Тому, в цій роботі пропонується детально зосередитись на цьому актуальному питанні.

Мета статті – визначення втомної міцності довгобазної вагон-платформи за допомогою різних методів оцінки, які базуються на проведенні експериментальних досліджень та регламентовані діючою нормативною документацією.

Матеріал та результати досліджень. Дослідження проведено на довгобазному вагоні-платформі, призначеному для перевезення великотоннажних контейнерів типорозмірів 1А, 1АА, 1АХ, 1С, 1СС, 1СХ у будь-яких допустимих комбінаціях. Довжина вагона по осях автоточок становить 25,62 м, база – 18,5 м. Рама вагон-платформи є зварною металоконструкцією, основними несучими елементами якої є хребтова та бічні балки. Хребтова балка є зварною конструкцією коробчастого перерізу змінної висоти і товщини за довжиною. Бічні балки мають двотавровий перетин, виконаний однієї висоти за всією довжиною з вертикальними підсилюючими ребрами. Бокові балки з'єднані між собою шворневими балками, проміжними поперечними балками та розкосами.

Для перевірки втомної міцності виконано розрахунок опору втоми рами за умови багатоциклового ресурсного навантаження. Результати розрахунків показали, що конструкція витримує діючі навантаження з достатніми запасами міцності на весь призначений термін служби.

З метою експериментального дослідження втомної міцності довгобазна вагон-платформа піддавалась наступним видам випробувань: статичні випробування на міцність, ходові міцносні випробування, циклічні ресурсні випробування на втому.

Коефіцієнт запасу опору втоми для найбільш навантажених зон визначено такими способами:

- експериментально-розрахунковим методом з використанням даних статичних випробувань на міцність $\sigma_{ст}$, МПа;
- за результатами ходових міцносних випробувань;
- за результатами ресурсних циклічних випробувань на втому (при цьому дані експлуатаційного навантаження взято для двох випадків – за результатами ходових міцносних випробувань та за результатами скидання з клинів).

Для зазначеної довгобазної вагон-платформи визначено коефіцієнт запасу опору втоми за кожним із вищеописаних методів.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Стосовно до несучих елементів конструкції вагонів для забезпечення характеристик опору втомни реалізується підхід, що не допускає появи в конструкції втомних ушкоджень протягом призначеного строку служби.

Відповідні вимоги до міцності, а також методики розрахунку та методи випробувань на втомну міцність наведено у відповідній документації [1–4, 14–18], згідно якої оцінка втомної міцності конструкції вагона визначається за коефіцієнтом запасу опору втомни n :

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,e}} \geq [n], \quad (1)$$

де: $\sigma_{a,N}$ – границя витривалості рами вагона-платформи (експериментально визначається в процесі втомних випробувань або розрахунковим методом);

$\sigma_{a,e}$ – приведена до бази амплітуда динамічних напружень в досліджуваній зоні рами, еквівалентна за пошкоджуючим впливом реальному режиму експлуатаційних випадкових напружень за проектний строк служби вагона. Визначається експериментально-розрахунковим шляхом (за результатами ходових міцносних випробувань або скидання з клинів).

За умов визначення $\sigma_{a,e}$ в досліджуваній зоні експериментально-розрахунковим шляхом (скидання з клинів) [1, 15]:

$$\sigma_{a,e} = \frac{\sigma_{a,кл}}{\sigma_{a,кл}^H} \sigma_{a,e}^H, \quad (2)$$

де: $\sigma_{a,кл}$ – амплітуда динамічного напруження, зареєстрована в досліджуваній зоні рами під час випробувань зі скидання вагона з клинів;

$\sigma_{a,кл}^H$ – амплітуда динамічного напруження, зареєстрована в центральному перерізі рами під час випробувань зі скидання вагона з клинів;

$\sigma_{a,e}^H$ – розрахункова еквівалентна приведена амплітуда динамічних напружень в центральному перерізі рами під час руху вагона в експлуатації [1–3]:

$$\sigma_{a,e}^H = \sigma_{cm}^H \cdot K_{\partial,e}, \quad (3)$$

де: σ_{cm}^H – статичне напруження в центральному перерізі рами, виміряне під час випробувань з експлуатаційною схемою навантаження;

$K_{\partial,e}$ – еквівалентний приведений коефіцієнт вертикальної динаміки в центральному перерізі рами вагона [1–4]:

$$K_{\partial,e} = \sqrt[m]{\frac{N}{N_0} \sum_k (\bar{K}_{\partial s})_k^m P_k(V)}, \quad (4)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де: $(\bar{K}_{об})_k$ – середнє імовірне значення коефіцієнта вертикальної динаміки для k -ого інтервалу швидкості;

$P_k(V)$ – частіть повторення швидкостей в k -ому діапазоні (див. таблицю 1);

N – кількість циклів вертикальних коливань завантаженого вагона, що виникають за його строк служби [1, 3]:

$$N = f_e T_p, \quad (5)$$

f_e – ефективна частота процесу зміни динамічних навантажень, яка визначається за результатами скидання вагона з клинів або під час ходових міцносних випробувань;

T_p – сумарний час дії динамічних навантажень за строк служби [1, 3]:

$$T_p = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}(1 - K_{\Pi}), \quad (6)$$

де: \bar{L} – проектний пробіг вагона за розрахунковий строк служби;

\bar{V} – проектна середня технічна швидкість руху вагона (для вагонів з конструкційною швидкістю 120 км/год у відповідності з [1] $\bar{V} = 22,4$ м/с);

K_{Π} – коефіцієнт порожнього пробігу вагона. Для вагонів-платформ $K_{\Pi} = 0,4$.

В якості вихідного спектру навантаження центрального перерізу рами вагона-платформи приймається статистичний розподіл коефіцієнтів вертикальної динаміки, що відповідає розподілу швидкостей руху вагона в експлуатації, встановленого в [1] (таблиця 1).

Таблиця 1. Нормативна щільність розподілу швидкостей руху вагона-платформи з конструкційною швидкістю 120 км/год

Діапазон швидкостей, k	Середня швидкість в діапазоні, \bar{V}_k , м/с	Частота повторення швидкостей в діапазоні, $P_k(V)$
1	6,25	0,03
2	13,75	0,07
3	16,25	0,09
4	18,75	0,12
5	21,25	0,16
6	23,75	0,19
7	26,25	0,16
8	28,75	0,10
9	31,25	0,06
10	33,75	0,02

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Середнє ймовірне значення коефіцієнта вертикальної динаміки, яке відповідає середній швидкості в діапазоні, \bar{V}_k , обчислюється за формулою [1, 4]:

$$(\bar{K}_{ds})_k = \begin{cases} a\bar{V}_k / V_0, & \text{якщо } \bar{V}_k < V_0 \\ a + 3,6 \cdot 10^{-4} (\bar{V}_k - V_0) / \tilde{f}_{cm} & \text{якщо } \bar{V}_k \geq V_0 \end{cases}, \quad (7)$$

де: a – коефіцієнт, рівний для кузова вагона 0,05;

V_0 – порогові значення швидкості, $V_0 = 15$ м/с;

\tilde{f}_{cm} – приведений статичний прогин вагона-платформи при завантаженні до повної вантажопідйомності [1, 15]:

$$\tilde{f}_{cm} = f_{cm} - 0,5f_p, \quad (8)$$

f_{cm} – вимірний статичний прогин ресорного підвішування вагона, завантаженого до номінальної вантажопідйомності;

f_p – вимірний статичний прогин рами вагон-платформи, завантаженого до номінальної вантажопідйомності.

Розрахункова границя витривалості натурної деталі (вузла, конструкції) за амплітудою при базовому числі циклів обчислюється за формулою [1, 4, 15]:

$$\sigma_{a,N}^p = \bar{\sigma}_{a,N} \times \left((1 - Z_p \times v_{\sigma_{a,N}}) \right), \quad (9)$$

де: $\bar{\sigma}_{a,N}$ – середнє (медіанне) значення границі витривалості натурної деталі (в нашому випадку – рами вагона-платформи);

Z_p – квантиль розподілу, який відповідає односторонній ймовірності P . Враховуючи, що $\sigma_{a,N}$ – випадкова величина, що має нормальний закон розподілу, для основних несучих деталей вагонів рекомендується приймати $P = 0,95$ та $Z_p = 1,645$ ([1], п. 3.2.5).

$v_{\sigma_{a,N}}$ – коефіцієнт варіації границі витривалості деталі. Для низьколегованих сталей під час напівавтоматичного зварювання $v_{\sigma_{a,N}} = 0,07$ ([1], п. 3.2.5).

Середнє значення границі витривалості визначається за формулою [1, 4, 15]:

$$\bar{\sigma}_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{(\bar{K}_{\sigma})_k}, \quad (10)$$

де: $\bar{\sigma}_{-1}$ – середнє (медіанне) значення границі витривалості гладкого стандартного зразка із матеріалу деталі (рама) при симетричному циклі згину на базі N_0 циклів;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$(\bar{K}_\sigma)_K$ – середнє значення загального коефіцієнта зниження границі витривалості даної натурної деталі за відношенням до границі гладкого стандартного зразка, приймаємо $(\bar{K}_\sigma)_K = 4,5$ ([1], табл. 3.2).

Схема завантаження вагона-платформи під час проведення випробувань зображена на рис. 2.

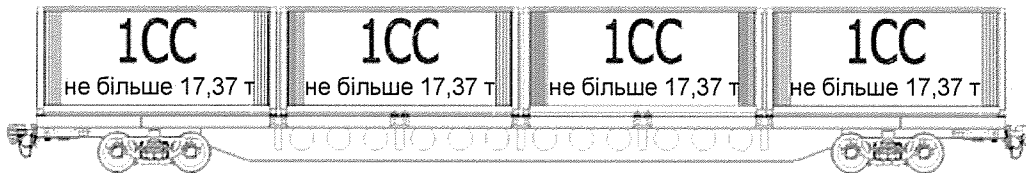


Рис. 2. Схема завантаження вагона під час проведення випробувань

Розрахункова кількість циклів під час випробувань склала [1, 3, 15]:

$$N_{sum}^p = \left(\left(\frac{\sigma_{a,N}^p}{\sigma_{a,sum}} \right) \right)^m \times N_0 = \left(\frac{34,5}{50} \right)^4 \times 10^7 = 2\,266\,712, \quad (11)$$

де: $\sigma_{a,N}^p \geq [n] \times \sigma_{a,e} \geq 1,15 \times 30 \geq 34,5$ МПа – розрахункова межа витривалості за амплітудою при базовому числі циклів;

$[n] = 1,15$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втомі ([3], табл.13).

Під час $N_{вип} = 2\,128\,000$ циклів у конструкції довгобазної вагона-платформи було виявлено тріщину в зоні з'єднання вертикального та нижнього листів хребтової балки у центральній зоні рами. Місцем зародження тріщини з'явився зварний шов області переходу вертикального листа хребтової балки з товщини 10 мм на товщину 8 мм.

Місця встановлення тензорезисторів та місце зародження тріщини наведено на рисунку 3. Характер руйнування рами вагона-платформи наведено на рисунку 4. При цьому коефіцієнт запасу опору втомі у місці зародження тріщини склав $n = 1,196$, за нормативного значення $[n] = 1,15$. Після виявлення тріщини випробування були продовжені з незмінною величиною випробувальної амплітуди $\sigma_{a,sum} = 50$ МПа на нижньому поясі хребтової балки у центральному перерізі рами з постійним контролем місця зародження та розвитку тріщини.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

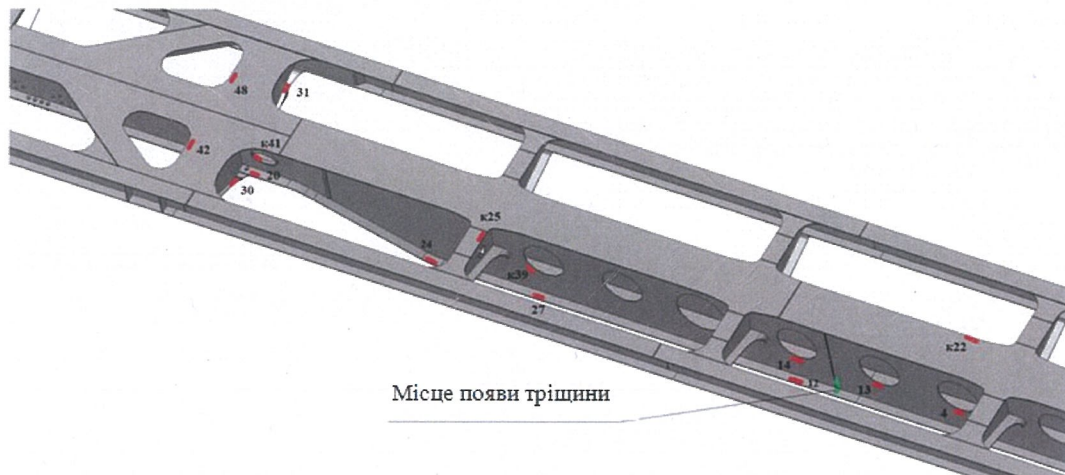


Рис. 3. Місця встановлення тензорезисторів та місце зародження тріщини

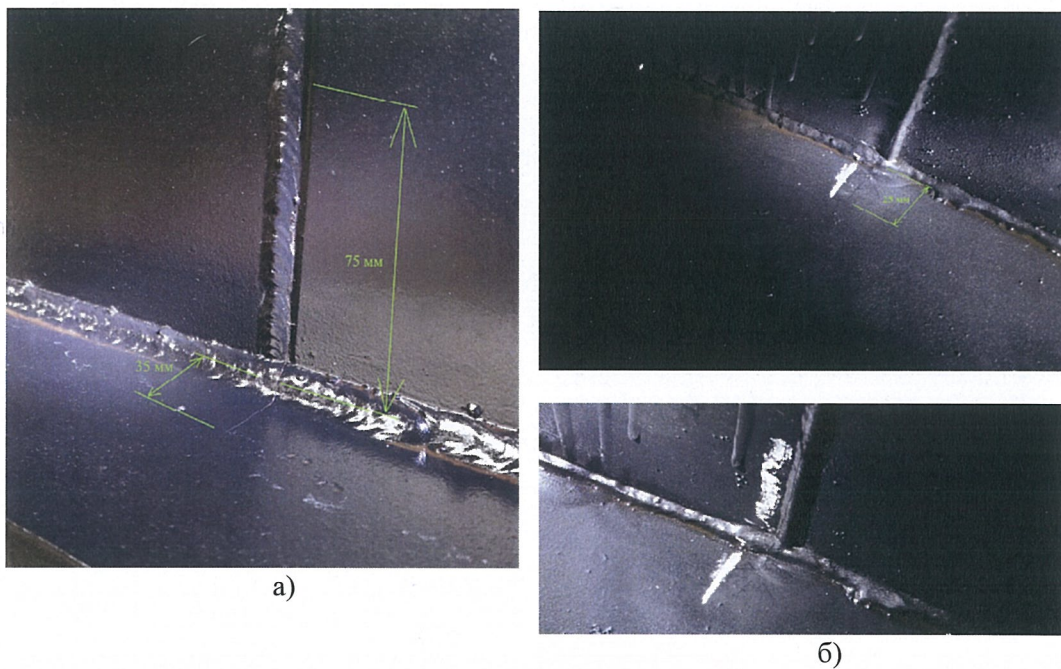
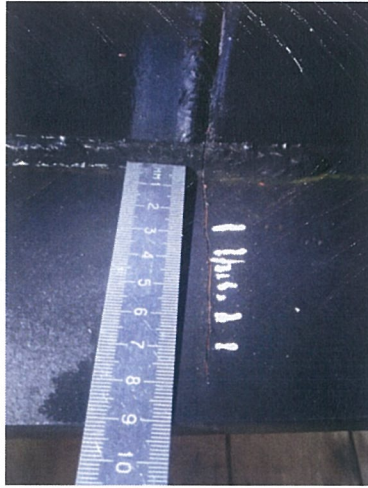


Рис. 4. Початок зародження тріщини:
вид зовні (а) та зсередини (б) хребтової балки рами вагона-платформи

При даному режимі було досягнуто $N_{вин} = 2267000$ циклів при базовому розрахунковому числі циклів для центрального перерізу рами $N_{вин}^P = 2266712$ циклів. Розмір тріщини на горизонтальному листі хребтової балки збільшився з 35 мм до 80 мм, на вертикальному листі – з 75 мм до 110 мм. При цьому конструк-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ція не втратила своєї несучої здатності. Характер розвитку втомної тріщини після досягнення $N_{\text{вип}} = 2\,267\,000$ циклів наведено на рисунку 5.



а)



б)

Рис. 5. Вид тріщини втоми після досягнення базового числа циклів: нижній (а) та верхній (б) лист хребтової балки вагона-платформи

При цьому коефіцієнт запасу опору втоми на нижньому поясі хребтової балки в центральному перерізі рами при $N_{\text{вип}} = 2\,267\,000$ циклів склав $n = 1,15$.

За даними експериментальних досліджень шляхом застосування формул (1)–(11) визначено коефіцієнти запасу опору втоми різними методами. Результати досліджень щодо визначення міцності конструкції довгобазної вагона-платформи за допомогою різних експериментально-розрахункових методів наведено в табл. 2.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2. Результати досліджень з визначення міцності конструкції вагона-платформи різними експериментально-розрахунковими методами

Зона досліджень конструкції	Коефіцієнт запасу опору втоми				
	З використанням даних статичних випробувань за $\sigma_{ст}$, МПа	За результатами ходових міцносних випробувань	За результатами ресурсних випробувань (дані експлуатаційного навантаження взято за результатами ходових міцносних випробувань)	За результатами ресурсних випробувань (дані експлуатаційного навантаження взято за результатами випробувань скидання з клинів)	[n]
1	2	3	4	5	6
Хребтова балка, нижній лист, центральний переріз	1,5	2,03	1,150	1,34	1,15
Хребтова балка, нижній лист, зона тріщини	1,7	4,00	1,196	1,15	1,15

Результати досліджень показують значну розбіжність даних, одержаних різними експериментально-розрахунковими методами. Таким чином, складність конструкції довгобазної вагона-платформи, різноманіття експлуатаційних навантажень і велика кількість факторів, що впливають на втомну міцність, актуалізують завдання щодо вдосконалення методів оцінки опору втоми рам довгобазних вагонів-платформ як на стадії проектування, так і на стадії обробки експериментальних даних.

Висновки.

1. Результати досліджень показують значну розбіжність даних, отриманих за допомогою різних експериментально-розрахункових методів, що свідчить про необхідність застосування комплексного підходу під час оцінки такого важливого показника як коефіцієнт запасу опору втоми довгобазного вагона-платформи. Значення коефіцієнта запасу опору втоми, отримане за результатами ходових міцносних випробувань, найбільше та має явно виражену розбіжність у порівнянні зі значеннями одержаними іншими методами. В той же час, значення коефіцієнтів запасу опору втоми, отримані з використанням даних статичних випробувань на міцність та за результатами циклічних випробувань на втому для двох випадків експлуатаційного навантаження, корелюються між собою та знаходяться на рівні нормативного значення. Підтверджено необхідність експериментального обґрунтування конструктивних рішень рами довгобазних вагонів-платформ та оцінки точності теоретичних розрахунків шляхом проведення ресурсних циклічних випробувань на втому.

2. Під час проектування довгобазних вагонів-платформ особливу увагу слід приділяти зонам розташування зварних швів і якості їх виконання, раціональному вибору форм деталей, що з'єднуються, розмірам і схемам розташування зварних швів, а також виключати геометричні концентратори напружень.

3. Складність конструкції довгобазних вагонів-платформ, різноманіття експлуатаційних навантажень і значна кількість факторів, що впливають на втомну міц-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ність, актуалізують завдання щодо вдосконалення методів оцінки опору втоми рам довгобазних вагонів-платформ як стадії проектування, так і на стадії обробки експериментальних даних.

Рекомендації.

В подальшому потрібно удосконалити існуючі або запропонувати нові методи оцінки опору втоми рам довгобазних вагонів-платформ як стадії проектування, так і на стадії обробки експериментальних даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. 317 с.
2. РД 24.050.37-95 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. М.: ГосНИИВ, 1995. 99 с.
3. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.
4. Типовая методика испытаний на сопротивление усталости / ВНИИЖТ-НВЦ Вагоны. М. 2007. 16 с.
5. Третяк Е.В., Сулим А.О., Хозя П.О. Основні типи конструкцій довгобазних вагонів-платформ та дослідження їх міцносних характеристик. Збірник наукових праць "Рейковий рухомий склад". 2020. Вип. 20. С. 27–33.
6. Кельріх М. Б., Федосов-Ніконов Д. В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. 2016. № 1 (225). С. 90 – 94.
7. Донченко А. В., Федосов-Ніконов Д. В. Методика розрахунково-експериментальних досліджень конструкції довгобазної платформи. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. 2016. Вип. 28. С. 53 – 60.
8. Чепурной А. Д., Литвиненко А. В., Шейченко Р. И., Граборов Р. В., Чубань М. А. Ходовые прочностные и динамические испытания вагона-платформы. Вісник НТУ "ХПІ". 2015. Вип. 31 (1140). С. 111 – 128.
9. Panchenko S., Fomin O., Vatulia G., Ustenko O., Lovska A. (2021). Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (109), 6 – 13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>
10. D. V. Fedosov-Nikonov, A. O. Sulym, V. V. Ilchysyn, O. M. Safronov, M. B. Kelrikh. (2020). Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 985. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>
11. Shatunov O. V., Shvets A. O. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2019. № 2 (80). С. 127 – 143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
12. Фомін О. В., Ловська А. О., Рибін А. В. Дослідження повздовжньої навантаженості вагона-платформи з наповнювачем в несучій конструкції. Наукові вісті Давіського університету. 2021. №21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17>
13. Анисимов П. С., Петров Г. И. Пространственные колебания вагона-платформы. Мир транспорта. 2014. №2. С. 20 – 26.
14. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. A concept of technology for freight wagons modernization. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 161. 012107 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>
15. ГОСТ 33788-2016 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Москва, Стандартинформ, 2016. 46 с.
16. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
17. Степнов М.Н., Чернышев С.Л., Ковалев И.Е., Зинин А.В. Характеристики сопротивления усталости. Расчетные методы оценки. М.: Технология машиностроения. 2010. 256 с.
18. Сопротивление материалов. Основы теории. Примеры. Задачи : учеб. пособие / С. В. Елизаров, Ю. П. Каптелин, Я. К. Кульгавий, Н. М. Савкин. - СПб.: ПГУПС, 2006. - 400 с. - ISBN 5-7641-0148-4.

A.O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

O.V. Orlov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-20-43, E-mail: oled.orlov81@gmail.com
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-1555-0297>

METHODS OF DETERMINING THE FATIGUE STRENGTH OF LONG-BASE FLAT WAGONS

This article analyzes the results of recent scientific research concerning the increasing the strength characteristics of long-base flat wagons. It was found that the issue of comprehensive analysis of fatigue strength determination of long-base flat wagons by various methods, which are based on performing experimental studies, was not considered in these studies. Therefore, it is proposed to focus on this topical issue in the work.

The place of initiation and development of a crack in the frame of a long-base flat wagon was established based on the results of endurance cyclic fatigue tests. The fatigue safety factor of the long-base flat wagon frame structure was determined based on the results of various evaluation methods: experimental and computational methods using the data of static tests, running strength tests, endurance cyclic fatigue tests (for two cases of operational load - based on the results of running strength tests and wedge tests). The necessity of applying a complex approach during the assessment of such an important indicator as the coefficient of fatigue resistance of a long-base flat wagon due to the discrepancy of data obtained by various experimental and calculation methods has been proven. The need for experimental substantiation of structural solutions of the frame of long-base flat wagons and assessment of the accuracy of theoretical calculations by means of resource cyclic fatigue tests has been confirmed. Further research should be focused on improving the existing and developing new methods for assessing the fatigue resistance of the frames of long-wheelbase flat wagons both at the design stage and at the stage of data processing of experimental studies.

Key words: long-base flat wagon, fatigue safety factor, evaluation method, endurance cycle tests, running strength tests.

REFERENCES

1. Normy dlya rascheta i proektirovaniya novyh i moderniziruemykh vagonov zheleznih dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh) [Norms for the calculation and design of new and upgraded wagons of railways of the Ministry of Railways of the 1520 mm gauge (non-self-propelled)]. (1996). Moscow: GosNIIV – VNIIZhT [in Russian]
2. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i hodovye kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and driving performance]. (1995). RD 24.050.37-95. M.: GosNIIV [in Russian]
3. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities] (2016). GOST 33211-2014. Moscow [in Russian]

4. Tipovaya metodika ispytaniy na soprotivlenie ustalosti [Typical test procedure for fatigue resistance] (2007). Moscow: VNIIZHT-NVC Vagony [in Russian]
5. Tretiak, E.V., Sulym, A.O., Khozia, P.O. (2020). Osnovni typy konstruksii dovhobaznykh vahoniv-platform ta doslidzhennia ikh mitsnosnykh kharakterystyk [The main types of structures of long-base flat wagons and the study of their strength characteristics]. *Zbirnyk naukovykh prats "Reikovy rukhomiy sklad" - Collection of scientific works "Railbound rolling stock"*, Iss. 20, 27–33 [in Ukrainian]
6. Kelrich, M. B., Fedosov-Nikonov, D. V. (2016). Doslidzhennia na mitsnist konstruksii dovhobaznoi platformy [Research on the strength of the structure of a long-base platform]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia - Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 1 (225), 90 – 94 [in Ukrainian]
7. Donchenko, A. V., Fedosov-Nikonov, D. V. (2016). Metodyka rozrakhunkovo-eksperymentalnykh doslidzhen konstruksii dovhobaznoi platformy [Methodology of calculation and experimental studies of the construction of a long-base platform]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnolohichnoho universytetu transportu. Seriya: Transportni systemy i tekhnolohii - Collection of scientific works of the State Economic and Technological University of Transport. Series: Transport systems and technologies*, 28, 53 – 60 [in Ukrainian]
8. Chepurnoy, A. D., Litvinenko, A. V., Sheichenko, R. I., Graborov, R. V., Chuban, M. A. (2015). Hodovy prochnostnye i dinamicheskie ispytaniya vagona-platformy [Running strength and dynamic tests of the platform car]. *Visnyk NTU KhPI - Bulletin of NTU "KhPI"*, 31 (1140), 111-128 [in Russian]
9. Panchenko, S., Fomin, O., Vatulia, G., Ustenko, O., Lovska, A. (2021). Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (109), 6 – 13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>
10. Fedosov-Nikonov, D. V., Sulym, A. O., Ilchysyn, V. V., Safronov, O. M., Kelrikh, M. B. (2020). Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 985. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>
11. Shatunov, O. V., Shvets, A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport - Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2 (80), 127 – 143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
12. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Rybin, A. V. (2021). Doslidzhennia povzdovzhnoi navantazhenosti vahona-platformy z napovniuvachem v nesuchii konstruksii [Research of the longitudinal loading of a flat wagon with filler in the load-bearing structure]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu - Scientific news of Dahl University*, 21 DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17> [in Ukrainian]
13. Anisimov, P. S., Petrov, G. I. (2014). Prostranstvennye kolebaniya vagona-platformy [Spatial oscillations of the flat wagon]. *Mir transporta - World of Transport*, 2, 20 – 26 [in Russian]
14. Placzek, M., Wróbel, A., Buchacz, A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 161. 012107 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>
15. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities]. (2016). *GOST 33788-2016*. Moscow: Standartinform [in Russian]
16. Terentev, V.F. (2003). *Ustalost metallicheskih materialov [Fatigue of metallic materials]*. Moscow: Nauka [in Russian]
17. Stepanov, M.N., Chernyshev, S.L., Kovalev, I.E., Zinin, A.V. (2010). *Harakteristiki soprotivleniya ustalosti. Raschetnye metody ocenki [Fatigue resistance characteristics. Estimation technique]*. M.: Tekhnologiya mashinostroeniya [in Russian]
18. Elizarov, S.V., Kaptelin, Yu.P., Kulgavij, Ya. K., Savkin, N. M. (2006). *Soprotivlenie materialov. Osnovy teorii. Primery. Zadachi [Strength of materials. Fundamentals of the theory. Examples. Tasks]*. Saint-Petersburg.: PGUPS. ISBN 5-7641-0148-4 [in Russian].