

## АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ОЦІНКА ЇХ ВПЛИВУ НА ЗВАРНІ З'ЄДНАННЯ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО НАПІВПРИЧЕПА

У даній роботі розглянуто вплив експлуатаційних навантажень на конструкцію рефрижераторного напівпричепи в умовах реальної роботи на міжнародних маршрутах. Об'єктом дослідження є рефрижераторний напівпричіп Krone Cool Liner. Було проаналізовано конструктивні особливості силової рами, ізотермічного кузова та найбільш навантажених зварних вузлів. Показано, що в процесі експлуатації на конструкцію одночасно діють динамічні, вібраційні та температурні навантаження, які формують змінний напружений стан у зонах зварних з'єднань. Також показано те, що вони можуть спричиняти накопичення втомних пошкоджень.

Для оцінювання рівня експлуатаційної навантаженості причепа використано дані телеметрії, отримані впродовж одного місяця роботи транспортного засобу під час виконання міжнародних перевезень температурних вантажів, зокрема відомості про пробіг, швидкість руху, цикли старт-стоп, повну масу автопоїзда, характер дорожнього покриття та температурний режим. На основі цих даних було запропоновано новий підхід до непрямого оцінювання навантаженості конструкції без застосування спеціалізованої тензометричної апаратури. Для інтегрального урахування впливу динамічних подій, фонові вібрації та температурних циклів використано запропонований показник  $D_{exp}$ , який є відносним безрозмірним індексом накопиченої експлуатаційної навантаженості всієї конструкції.

Розрахунки показали, що найбільший внесок у загальний рівень експлуатаційного впливу формують саме циклічні вібраційні навантаження, тоді як динамічні події гальмування і прискорення та температурні цикли мають меншу, але також суттєву роль у формуванні сумарної деградаційної дії. Отримані результати було порівняно з характерними зонами пошкоджень зварних з'єднань, що спостерігаються в процесі експлуатації напівпричепів. Цей підхід дозволив підтвердити зв'язок між розрахунковими показниками навантаженості та фактичними проявами втомних дефектів. Додатково було проаналізовано конструктивну схему напівпричепи з виділенням найбільш навантажених елементів та потенційно критичних зон, у яких формується підвищена концентрація напружень. Отримані результати підтверджують доцільність використання стандартних телеметричних параметрів для порівняльного аналізу режимів експлуатації, а також оцінювання навантаженості конструкції рефрижераторних напівпричепів у реальних умовах перевезень.

**Ключові слова:** рефрижераторний напівпричіп, експлуатаційні навантаження, зварні з'єднання, вібраційні навантаження, температурні цикли, телеметричні дані, втомні пошкодження, інтегральний показник навантаженості.

**Постановка проблеми.** Рефрижераторні напівпричепи працюють в умовах комбінованих навантажень, що включають динамічні впливи від дорожнього покриття, інерційні сили при гальмуванні та прискоренні, а також термічні впливи, зумовлені температурними перепадами. Конструкція таких напівпричепів характеризується поєднанням жорсткої рами та тонкостінних елементів кузова з великою кількістю зварних з'єднань. Сукупна дія навантажень формує змінний напружений стан, що є найбільш небезпечний для зварних вузлів, де відбувається накопичення втомних пошкоджень. У зв'язку з цим

## Машинобудування і зварювальне виробництво

актуальним є оцінювання експлуатаційної навантаженості конструкції на основі реальних даних роботи транспортного засобу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних досліджень показує, що визначальний вплив на напружений стан конструкцій транспортних засобів мають динамічні навантаження, зумовлені взаємодією коліс із нерівностями дорожнього покриття. У роботах, присвячених динаміці транспортних засобів, встановлено, що саме ці впливи формують основні амплітуди змінних напружень у несучих елементах конструкції [1].

Оцінювання довговічності конструкцій базується на підходах втомного аналізу, що враховують циклічний характер навантаження. Зокрема, показано, що окремі фрагменти випадкового багатовісного навантаження можуть мати визначальний вплив на накопичення пошкоджень та ресурс елементів машин [2]. Узагальнені положення теорії втоми свідчать, що навіть при відносно невеликих напруженнях значна кількість циклів навантаження призводить до розвитку втомних тріщин, особливо у зонах концентрації напружень, характерних для зварних з'єднань [3].

Числові методи, зокрема метод скінченних елементів у поєднанні зі спектральним аналізом випадкових навантажень, широко застосовуються для оцінювання довговічності конструкцій транспортних засобів. Для напівпричепів показано ефективність такого підходу при моделюванні накопичення втомних пошкоджень у реальних умовах експлуатації [4]. При цьому форма кривих втоми у високочастотній області суттєво впливає на результати оцінювання ресурсу конструкцій [5].

Разом із механічними навантаженнями, для рефрижераторних напівпричепів важливу роль відіграють температурні режими експлуатації, що визначаються умовами перевезення швидкопсувних вантажів відповідно до нормативних вимог [6]. Конструктивні особливості таких напівпричепів, зокрема наявність ізотермічного кузова та специфічна схема силової рами, впливають на характер розподілу навантажень і напружень у зонах зварних з'єднань [7].

Таким чином, існуючі підходи до оцінювання навантаженості конструкцій транспортних засобів базуються переважно на експериментальних або числових методах. Водночас використання телеметричних даних реальної експлуатації для інтегрального оцінювання навантаженості конструкції залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого розвитку.

**Мета дослідження.** Оцінювання експлуатаційної навантаженості конструкції рефрижераторного напівпричепа на основі телеметричних даних із використанням інтегрального показника  $D_{exp}$ .

**Основний матеріал дослідження.** Об'єктом дослідження є рефрижераторний напівпричіп типу Krone Cool Liner, що використовується у міжнародних перевезеннях харчової продукції. Конструкція напівпричепа відповідає типовій схемі ізотермічних транспортних засобів і включає силову раму, ходову частину та ізотермічний кузов із сендвіч-панелей [7] (рис. 1).

Поєднання жорсткої рами та тонкостінних елементів кузова зумовлює підвищену чутливість зварних з'єднань до дії циклічних навантажень. Наведена схема відображає типову конструкцію напівпричепів даного типу та використовується для ідентифікації найбільш навантажених елементів конструкції.

Вихідні параметри розрахунку сформовано на основі телеметричних даних експлуатації напівпричепа за лютий 2026 року. Узагальнені параметри наведено в табл. 1.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

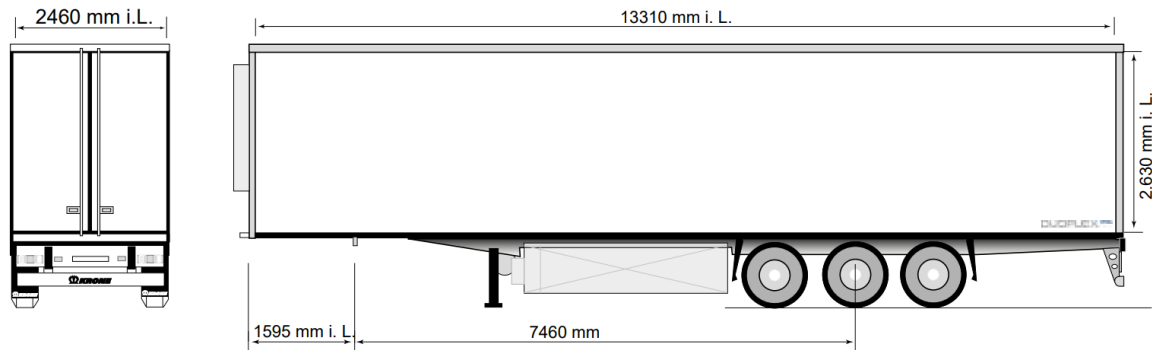


Рисунок 1 - Типова конструктивна схема рефрижераторного напівпричепа типу Krone Cool Liner (на основі технічних креслень виробника).

Таблиця 1 – Вихідні параметри розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Технічно допустима повна маса	$m_{ref}$	39.0	т
Середня повна маса під час руху	$m_{avg,move}$	31.468	т
Середня повна маса в динамічних режимах	$m_{avg,dyn}$	31.339	т
Загальний пробіг за період	$L_{run}$	2627.15	км
Частка пробігу по національних трасах	$P_{nat}$	0.86	-
Частка пробігу по інших дорогах	$P_{oth}$	0.14	-
Середній температурний перепад	$\Delta T$	12.68	°C
Кількість темп. циклів > 10 °C/год	$N_{temp}$	24	шт
Довжина вібр. циклу (нац. траси)	$\lambda_{nat}$	0.50	км
Довжина вібр. циклу (інші дороги)	$\lambda_{oth}$	0.25	км
Кількість різких прискорень у завантаженому стані	$N_{acc,loaded}$	380	шт
Кількість різких прискорень у порожньому стані	$N_{acc,empty}$	128	шт
Кількість різких гальмувань у завантаженому стані	$N_{br,loaded}$	408	шт
Кількість різких гальмувань у порожньому стані	$N_{br,empty}$	144	шт

Різкі прискорення та гальмування визначалися за критерієм зміни швидкості транспортного засобу у часі ( $\Delta v/\Delta t$ ) із використанням порогового значення, що дозволяє ідентифікувати динамічні події, які супроводжуються підвищеними інерційними навантаженнями на конструкцію.

Для інтегральної оцінки впливу експлуатаційних факторів на конструкцію напівпричепа використано індекс накопиченої експлуатаційної деградації  $D_{exp}$ , який інтегрально враховує внесок динамічних подій, фонові вібрації та температурних циклів.

Розрахунок показника виконується за залежністю:

$$D_{exp} = k_1 * k_m * N_{dyn} + k_2 * k_{mv} * N_{vib} + k_3 * (\Delta T * N_{temp})$$

## Машинобудування і зварювальне виробництво

де:  $k_1, k_2, k_3$  - коефіцієнти вагомості динамічної, вібраційної та температурної складових;

$k_m, k_{mv}$  - коефіцієнти масової навантаженості;

$N_{dyn}$  - кількість динамічних подій;

$N_{vib}$  - кількість приведених вібраційних циклів;

$\Delta T$  - характерний температурний перепад;

$N_{temp}$  - кількість температурних циклів.

Кількість динамічних подій визначається:

$$N_{dyn} = N_{acc,loaded} + N_{acc,empty} + N_{br,loaded} + N_{br,empty} = 1060$$

Оцінювання кількості вібраційних циклів виконано з урахуванням того, що при русі транспортного засобу по нерівностях дорожнього покриття формується квазіперіодичний процес навантаження:

$$N_{vib} = \frac{(P_{nat} * L_{run})}{\lambda_{nat}} + \frac{(P_{oth} * L_{run})}{\lambda_{oth}} \approx 5990$$

Значення довжини вібраційного циклу  $\lambda_{nat}$  та  $\lambda_{oth}$  прийнято на основі узагальнених літературних даних та інженерних оцінок, що враховують характер нерівностей дорожнього покриття для відповідних типів доріг. Прийняті значення відображають середню відстань між характерними збуреннями, які формують циклічні навантаження на конструкцію напівпричепи.

Коефіцієнти масової навантаженості визначено відносно допустимої маси напівпричепи:

$$k_m = \frac{31.339}{39} \approx 0.8, \quad k_{mv} = \max\left(\frac{m_{avg,move}}{m_{ref}}, 0.4\right) \approx 0.81$$

Обмеження  $k_{mv} \geq 0.4$  враховує підвищення інтенсивності вібраційних навантажень при зменшенні маси транспортного засобу, що зумовлено зростанням прискорень і амплітуди коливань при проходженні нерівностей дорожнього покриття.

Коефіцієнти вагомості прийнято на основі узагальнення результатів досліджень динаміки та втомної міцності конструкцій транспортних засобів [1–5]. При цьому найбільше значення коефіцієнта  $k_1=0.5$  відповідає динамічним навантаженням, які формують максимальні рівні напружень, тоді як коефіцієнт  $k_2=0.25$  характеризує вплив фонові вібрації, що має меншу амплітуду, але значну кількість циклів. Коефіцієнт  $k_3=0.2$  враховує температурні впливи, які мають допоміжний характер у формуванні напруженого стану конструкції.

У розрахунку прийнято лінійну залежність впливу температурних циклів, що є спрощеним інженерним припущенням і відображає пропорційний зв'язок між величиною температурного перепаду та рівнем термічних напружень у конструкції.

За результатами розрахунку отримано:

- динамічна складова: 424;

- вібраційна складова:  $\approx 1213$ ;

- температурна складова:  $\approx 61$ .

Загальне значення індексу:

$$D_{exp} \approx 1698$$

Отримане значення показника  $D_{exp}$  має безрозмірний характер і відображає інтегральний рівень експлуатаційної навантаженості конструкції за розглянутий період. Зазначений показник не має прямої фізичної інтерпретації у вигляді сили або напруження та використовується як відносний критерій для порівняння різних режимів експлуатації,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

маршрутів або транспортних засобів. Збільшення значення  $D_{exp}$  відповідає зростанню інтенсивності накопичення втомних пошкоджень у конструкції.

Отриманий результат свідчить, що визначальний внесок у експлуатаційну навантаженість конструкції формує фонова вібрація. Тоді як динамічні події та температурні впливи мають менший, але суттєвий вплив.

Для підтвердження отриманих результатів було проаналізовано фактичні пошкодження конструкції напівпричепа, що виникають у процесі експлуатації. Характерні приклади втомних дефектів зварних з'єднань (тріщин) та деформацій елементів кузова наведено на рис. 2.

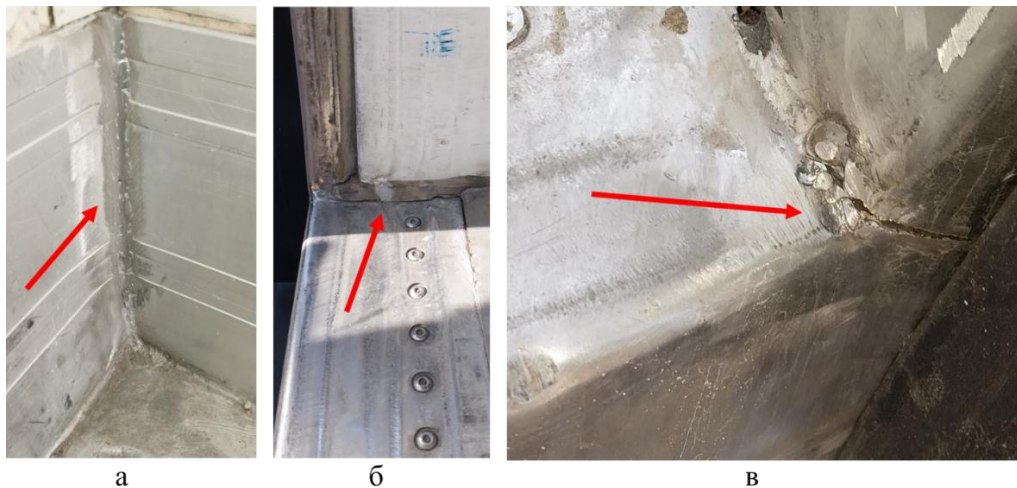


Рисунок 2 – Характерні пошкодження конструкції рефрижераторного напівпричепа: а - ділянка стику сендвіч-панелей із ознаками експлуатаційної деформації та відновлення; б - відшарування зварного шва горизонтального елемента дверної рами; в - тріщина у зварному з'єднанні кутового вузла дверної рами.

Аналіз показує, що пошкодження локалізуються у зонах концентрації напружень та у місцях дії циклічних навантажень, зокрема в елементах дверної рами та стиках конструктивних панелей. Це узгоджується з результатами розрахунку, згідно з якими визначальний внесок у навантаженість конструкції формують вібраційні впливи, що мають високий рівень циклічності.

Для узагальнення отриманих результатів та просторової інтерпретації зон навантаженості конструкції на рис. 3 наведено схему напівпричепа з виділенням характерних зон впливу експлуатаційних навантажень червоним кольором.

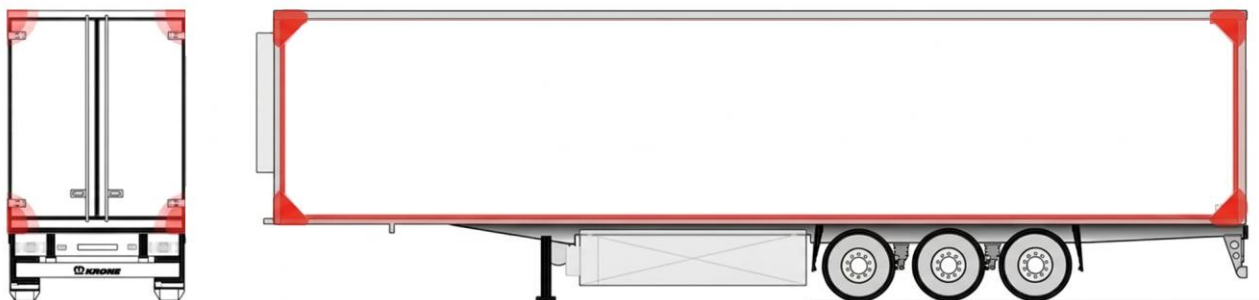


Рисунок 3 – Схема характерних зон підвищеної експлуатаційної навантаженості конструкції рефрижераторного напівпричепа

Виділені зони відображають як локальні області концентрації напружень (кутові вузли та елементи дверної рами), так і протяжні ділянки, що зазнають впливу тривалих вібраційних навантажень (стики сендвіч-панелей кузова). Хоча основні динамічні навантаження генеруються в зоні ходової частини, їх передача на тонкостінні елементи конструкції зумовлює накопичення втомних пошкоджень саме у зварних з'єднаннях та елементах кузова.

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило виконати комплексну оцінку експлуатаційної навантаженості несучих елементів рефрижераторного напівпричепа, спираючись на масив телеметричних даних реальних рейсів. Ключовим результатом роботи стало обґрунтування та апробація методики інтегрального врахування різнорідних впливів - від динамічних поштовхів до температурних коливань за допомогою розрахункового безрозмірного показника  $D_{exp}$ . Такий підхід продемонстрував свою ефективність як інструмент непрямого моніторингу стану конструкції, що не потребує розгортання дороговартісних тензометричних систем у польових умовах.

Аналіз отриманих розрахункових значень показав доволі неочікуваний розподіл факторів впливу: в умовах типових міжнародних перевезень домінуючий внесок у деградацію конструкції (понад 70%) формують саме циклічні вібраційні процеси. Хоча разові динамічні події, такі як різке гальмування чи прискорення, є більш амплітудними, їхня сумарна частка в накопиченні втомних пошкоджень виявилася меншою. Температурна ж складова за досліджуваний період відіграє скоріше фонову роль, створюючи передумови для подальшої дії механічних напружень у зварних вузлах.

Особливу увагу варто приділити тому, що отримані теоретичні результати цілком узгоджуються з картиною реальних пошкоджень, зафіксованих під час технічних оглядів напівпричепів. Найбільш вразливими до виявленого спектра навантажень виявилися зварні з'єднання дверної рами, кутові вузли та зони стику сендвіч-панелей. Те, що виявлені в експлуатації тріщини зварних швів локалізовані саме в зонах, які модель ідентифікувала як критичні, підтверджує адекватність запропонованого методу.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що вібраційна навантаженість, яка передається від ходової частини на тонкостінний кузов, є визначальним чинником передчасного виходу з ладу зварних елементів. Запропонована методика використання стандартних параметрів телеметрії відкриває шлях до створення систем предиктивного обслуговування, дозволяючи кількісно оцінювати ресурс напівпричепів у реальному часі без втручання в їхню конструктивну схему.

### *Список використаних джерел*

1. Jacobson B. Vehicle dynamics and road load analysis. Royal Institute of Technology. 2012. URL: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/244369/244369.pdf> .
2. Niesłony A. Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components. Mechanical Systems and Signal Processing. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.05.010> .
3. Stephens R.I., Fatemi A., Stephens R.R., Fuchs H.O. Metal Fatigue in Engineering. 2000. URL: [https://www.researchgate.net/publication/310302257\\_Metal\\_Fatigue\\_in\\_Engineering](https://www.researchgate.net/publication/310302257_Metal_Fatigue_in_Engineering) .
4. Cesário A.A., Mattos C., Lima L. Fatigue assessment of a semi-trailer using FE spectral analysis combined with random fatigue calculation. Proceedings of the 10th World Congress on Computational Mechanics. 2014. DOI:10.5151/meceng-wccm2012-19309.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

5. Sonsino C.M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. *International Journal of Fatigue*. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.11.015> .

6. UNECE. Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs (ATP). URL:[https://unece.org/DAM/trans/main/wp11/ATP\\_publication/ATP-2016e\\_def-web.pdf](https://unece.org/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/ATP-2016e_def-web.pdf) .

7. Krone. Box semi-trailers (Cool Liner). Technical documentation. URL:[https://www.krone-fleet.com/fileadmin/media/dokumente/koffer-sattelauflieger/koffersattelauflieger\\_de.pdf](https://www.krone-fleet.com/fileadmin/media/dokumente/koffer-sattelauflieger/koffersattelauflieger_de.pdf) .

Sarakhman A.V.

### ANALYSIS OF OPERATIONAL LOADS AND ASSESSMENT OF THEIR IMPACT ON WELDED JOINTS OF A REFRIGERATED SEMI-TRAILER

*The paper considers the impact of operational loads on the structure of a refrigerated semi-trailer under real operating conditions on international routes. The object of the study is a Krone Cool Liner refrigerated semi-trailer. The structural features of the load-bearing frame, insulated body, and the most highly loaded welded joints were analyzed. It is shown that during operation the structure is simultaneously subjected to dynamic, vibration, and thermal loads, which form a variable stress state in welded joint areas. It is also shown that they may lead to the accumulation of fatigue damage.*

*To assess the level of operational loading of the trailer, telematics data obtained over one month of vehicle operation during international temperature-controlled transport were used, including information on mileage, vehicle speed, start-stop cycles, total vehicle mass, road conditions, and temperature regime. Based on these data, a new approach to indirect assessment of structural loading without the use of specialized strain measurement equipment was proposed. For the integrated consideration of dynamic events, background vibration, and temperature cycles, the proposed indicator  $D_{exp}$  is used, which is a relative dimensionless index of accumulated operational loading of the entire structure.*

*The calculations showed that the dominant contribution to the overall level of operational impact is formed by cyclic vibration loads, while dynamic events such as braking and acceleration, as well as temperature cycles, have a smaller but still significant role in the formation of the overall degradation effect. The obtained results were compared with characteristic damage zones of welded joints observed during semi-trailer operation. This approach made it possible to confirm the relationship between the calculated loading indicators and the actual manifestations of fatigue defects. In addition, the structural scheme of the semi-trailer was analyzed with identification of the most highly loaded elements and potentially critical zones where increased stress concentration occurs. The obtained results confirm the feasibility of using standard telematics parameters for comparative analysis of operating conditions, as well as for assessing the structural loading of refrigerated semi-trailers under real transport conditions.*

**Keywords:** *refrigerated semi-trailer, operational loads, welded joints, vibration loads, temperature cycles, telematics data, fatigue damage, integrated load index.*

*Стаття надійшла 10.03.2026р.*

*Стаття прийнята 15.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*