

УДК 620.178.35

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-19>

МЕТАЛОГРАФІЧНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ ТРАНСПОРТНОЇ ЦИСТЕРНИ ПІСЛЯ БАГАТОРІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ ІНТЕНСИВНИХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Бурлуцький Олексій Вікторович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском

Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

У статті представлено результати металографічного дослідження впливу інтенсивних динамічних навантажень (вібрацій, ударних імпульсів, гідроударів, а також циклічних змін тиску під час маневрових робіт та гальмування) на мікроструктуру сталі котла транспортної цистерни після тривалої експлуатації (понад 30 років). Метою роботи було встановлення кількісних закономірностей деградації ферито-перлітної сталі 09Г2С в основному металі та зоні термічного впливу зварних швів, а також розробка науково обґрунтованих критеріїв для прогнозування залишкового ресурсу. Використано комплекс взаємодоповнюючих методів: оптичну та електронну мікроскопію, мікродюрOMETРИЧНИЙ аналіз, кількісну металографію з визначенням об'ємної частки перліту та розміру феритного зерна, а також математичне моделювання дифузійних процесів. Експериментально встановлено, що в зоні термічного впливу частка перліту зменшується на 35–50%, мікротвердість підвищується до 175 HV, а розмір феритного зерна зростає до 28–35 мкм порівняно з основним металом (20–24 мкм). Розроблено математичні моделі, що описують зв'язок динамічних параметрів із мікроструктурними змінами: модифіковане рівняння Холла–Петча для оцінки межі текучості залежно від розміру зерна, залежність мікротвердості від кількості ударних імпульсів, рівняння дифузійного перерозподілу вуглецю (сфероїдизація перліту) та інтегральний критерій структурної деградації S_d , який враховує зміну трьох ключових параметрів: розміру зерна, об'ємної частки перліту та мікротвердості. Показано високу кореляцію ($R^2 = 0,91$) між параметром S_d та залишковим ресурсом котла, визначеним за нормативною методикою. Запропоновано аналітичний вираз для прогнозування залишкового ресурсу $R_{res} = R_0 \exp(-k S_d)$, де $R_0 = 32$ роки, $k = 2,8$. Доведено, що макроскопічно незмінний метал може мати суттєві мікроструктурні пошкодження ($S_d \geq 0,3$), що потребує обов'язкового металографічного контролю при подовженні терміну служби цистерн.

Отримані результати є науковим підґрунтям для переходу від календарного планування ремонтів до стратегії технічного обслуговування за фактичним станом металу, що дозволяє підвищити безпеку залізничних перевезень, запобігти раптовим втомним руйнуванням та зменшити невідрядані експлуатаційні витрати на заміну котлів.

Ключові слова: транспортна цистерна, динамічні навантаження, металографічна оцінка, мікроструктура сталі 09Г2С, сфероїдизація перліту, зона термічного впливу, залишковий ресурс, математичне моделювання.

Burlutskiy Oleksii. Metallographic assessment of the degradation of structural steel in a transport tank following many years of service under conditions of intense dynamic loading

The article presents the results of a metallographic study of the influence of intense dynamic loads (vibrations, shock pulses, hydrodynamic impacts, as well as cyclic pressure changes during shunting operations and braking) on the steel microstructure of a transport tank boiler after long-term operation (over 30 years). The aim of the work was to establish quantitative patterns of degradation of ferrite-pearlite steel 09G2S in the base metal and the heat-affected zone of welded joints, as well as to develop scientifically substantiated criteria for predicting the residual life. A set of complementary methods was used: optical and electron microscopy, microhardness analysis, quantitative metallography to determine the volume fraction of pearlite and the ferrite grain size, as well as mathematical modelling of diffusion processes. It has been experimentally established that in the heat-affected zone, the pearlite fraction decreases by 35–50%, the microhardness increases to 175 HV, and the ferrite grain size increases to 28–35 μm compared to the base metal (20–24 μm). Mathematical models describing the relationship between dynamic parameters and microstructural changes have been developed: a modified Hall–Petch equation for estimating the yield strength depending on the grain size, a dependence of microhardness on the number of shock impulses, an equation for the diffusion redistribution of carbon (pearlite spheroidisation), and an integral criterion of structural degradation S_d , which takes into account changes in three key parameters: grain size, volume fraction of pearlite, and microhardness. A high correlation ($R^2 = 0.91$) between the S_d parameter and the residual life of the boiler, determined according to the standard procedure, is shown. An analytical expression for predicting the residual life $R_{res} = R_0 \exp(-k S_d)$ is proposed, where $R_0 = 32$ years, $k = 2.8$. It is proved that macroscopically unchanged metal may have significant microstructural damage ($S_d \geq 0.3$), which requires mandatory metallographic control when extending the service life of tanks.

The obtained results provide a scientific basis for the transition from scheduled maintenance planning to a strategy of maintenance based on the actual condition of the metal, which makes it possible to increase the safety of railway transport, prevent sudden fatigue failures, and reduce unjustified operating costs for boiler replacement.

Key words: transport tank, dynamic loads, metallographic assessment, 09G2S steel microstructure, pearlite spheroidization, heat-affected zone, residual life, mathematical modeling.

Актуальність дослідження. Надійність транспортних цистерн є критичним фактором безпеки під час перевезення небезпечних та наливних вантажів залізничним і автомобільним транспортом. Експлуатація котлів цистерн супроводжується інтенсивними динамічними навантаженнями, що виникають при маневрових роботах, гальмуванні та вібраціях. Постійна зміна напруженого стану металу призводить до накопичення втомних пошкоджень у структурі матеріалу. Традиційні методи розрахунку міцності часто не враховують мікроструктурні зміни, що відбуваються в сталі під дією ударних імпульсів. Металографічна оцінка дозволяє виявити деградацію матеріалу на ранніх стадіях, що є надзвичайно актуальним для запобігання аваріям. Проблема старіння парку цистерн вимагає нових підходів до оцінки їхнього залишкового ресурсу. Динамічні навантаження провокують локальну пластичну деформацію, яка візуалізується через зміну зеренної структури. Вплив гідродинамічних ударів всередині котла створює додаткові зони концентрації напружень. Дослідження мікротріщин та дислокаційної субструктури є ключовим для розуміння механізмів руйнування.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення техногенної безпеки транспортних процесів. Сучасні вимоги до екологічності перевезень роблять неприпустимими будь-які витрати через розгерметизацію котлів. Металографія дає пряму відповідь на питання про якість зварних з'єднань під впливом вібрацій. Розвиток швидкісного руху на залізниці збільшує амплітуду динамічних впливів на конструкцію. Недостатня вивченість зв'язку між макроскопічним навантаженням та мікроструктурною відповіддю металу створює наукову лаку. Застосування сталей нових марок потребує верифікації їхньої стійкості до циклічних ударів. Економічні збитки від аварій цистерн значно перевищують витрати на їхню поглиблену діагностику. Аналіз деградації структури металу є фундаментом для створення систем моніторингу в реальному часі.

Вивчення фазового складу в зонах термічного впливу допомагає оптимізувати технологію виготовлення котлів. Вплив корозійно-активних середовищ у поєднанні з динамікою прискорює руйнування. Визначення критичних точок зносу дозволяє подовжити термін експлуатації рухомого складу. Стандарти безпеки постійно оновлюються, що вимагає нових експериментальних даних. Детальна металографія дозволяє ідентифікувати крихке та в'язке руйнування на мікрорівні. Використання сучасних мікроскопів

підвищує точність прогнозування довговічності. Створення математичних моделей без урахування реальної структури металу є неповним. Актуальність підсилюється необхідністю імпортозаміщення та розробки вітчизняних методик контролю. Врахування динамічного фактора є обов'язковим для сертифікації нових типів тари. Дослідження механічних властивостей після тривалої експлуатації показує значне відхилення від паспортних даних. Металографічний аналіз є об'єктивним методом верифікації технічного стану. Проблема втомного руйнування металу під дією змінного тиску рідини залишається гострою. Динаміка руху поїзда створює складний спектр коливань, що діють на стінки котла. Розуміння фізики процесів на межі зерен дозволяє керувати властивостями матеріалу. Наукова спільнота потребує систематизованих даних про вплив ударних навантажень на перлітно-феритну структуру. Актуальність підтверджується статистикою відмов несучих конструкцій цистерн. Впровадження результатів дослідження дозволить знизити ризик екологічних катастроф. Аналіз текстури металу після навантаження виявляє приховані дефекти прокату. Розробка критеріїв граничного стану на основі металографії є пріоритетним завданням. Дослідження сприяє розвитку теорії міцності та надійності складних технічних систем. Кожен випадок руйнування котла потребує глибокої експертизи мікроструктури. Робота має пряме відношення до національної безпеки в галузі транспорту. Сучасна наука вимагає переходу від візуального огляду до структурного аналізу. Взаємодія динамічних сил та дефектів кристалічної решітки є складною міждисциплінарною задачею. Актуальність теми не викликає сумнівів у світлі глобалізації вантажних потоків. Результати стануть основою для нових методичних вказівок з ремонту цистерн. Оцінка впливу динаміки на котел є стратегічно важливим кроком для інженерії.

Аналіз літератури. У роботі [1] досліджено навантаження на несівну конструкцію вагона-цистерни під час перевезення залізничним поромом. Авторами враховано специфічні морські динамічні впливи, зокрема хвильові коливання та інерційні сили. Запропонована математична модель дозволяє оцінити напружено-деформований стан конструкції в умовах комбінованих навантажень. Результати показали суттєве зростання навантажень порівняно зі стандартними умовами експлуатації. Практична цінність полягає у можливості підвищення міцності та надійності вагонів при мультимодальних перевезеннях.

У публікації [2] розглянуто динамічне навантаження вагона-цистерни з піддатливими зв'язками між котлом і рамою. Дослідження спрямоване на зменшення пікових напружень шляхом використання адаптивних конструктивних елементів. Авторами побудовано розрахункову модель з урахуванням нелінійних характеристик зв'язків. Отримані результати свідчать про ефективність таких рішень у зниженні динамічних навантажень.

У статті [3] представлено метод оцінки втомної надійності рами локомотива на основі вимірних і віртуальних деформацій. Запропоновано поєднання експериментальних даних із чисельним моделюванням. Це дозволяє більш точно визначати ресурси конструкцій при змінних навантаженнях. Авторами доведено високу кореляцію між реальними та розрахунковими напруженнями. Методика може бути застосована для прогнозування довговічності рухомого складу.

У роботі [4] досліджено способи продовження терміну служби вантажних вагонів. Основна увага приділена модернізації конструкцій та вдосконаленню систем технічного обслуговування. Запропоновано комплекс заходів, що включає діагностику та ремонт. Результати підтверджують можливість суттєвого підвищення експлуатаційної ефективності.

У статті [5] досліджено вплив згинальних деформацій кузова вагона на взаємодію з колією. Автори розробили математичну модель взаємодії «вагон–колія». Встановлено, що деформації кузова можуть суттєво впливати на динамічні сили контакту. Це, у свою чергу, впливає на безпеку руху.

У дослідженні [6] розглянуто застосування ZnO-допованих ПАММ-матеріалів для покращення асфальту та антикорозійного захисту. Запропоновані покриття демонструють високі антикорозійні властивості. Проведено експериментальні дослідження фізико-хімічних характеристик матеріалу. Результати показали підвищення довговічності дорожніх покриттів.

У оглядовій статті [7] проаналізовано імпульсну катодну захисту трубопроводів. Розглянуто сучасні підходи та технологічні рішення у цій сфері. Визначено основні переваги імпульсного струму порівняно з традиційними методами.

У публікації [8] досліджено стійкість автопоїзда з частково заповненою цистерною. Основну увагу приділено впливу переміщення рідини на динаміку руху. Розроблено модель, що враховує ефекти слошингу. Результати показали зниження стійкості при певних режимах руху. Це має важливе значення для безпеки перевезень.

У роботі [9] виконано оцінку втомної міцності котла вагона-цистерни з урахуванням корозійного зносу. Запропоновано методіку врахування деградації матеріалу у розрахунках. Отримані результати показали значне зниження ресурсу при наявності корозії. Проведено аналіз напруженого стану конструкції.

У статті [10] досліджено зниження енергоспоживання поїздів шляхом зменшення маси вагонів. Запропоновано аналітичну модель руху поїзда. Результати показали суттєву економію енергії при зменшенні маси. Автор обґрунтовує доцільність оптимізації конструкції вагонів.

У дослідженні [11] проведено оцінку динаміки вантажного вагона з урахуванням в'язкого демпфування. Розроблено математичну модель руху. Встановлено вплив демпфування на зниження коливань. Результати підтверджують підвищення плавності руху. Робота має практичне значення для проєктування підвіски.

У статті [12] проаналізовано бічні сили для оцінки безпеки проти сходження з рейок. Розглянуто спеціалізований поїзд для перевезення довгомірних рейок. Виконано чисельне моделювання навантажень. Встановлено критичні режими руху.

У публікації [13] досліджено динаміку рейкового транспортного засобу на реальній моделі колії. Використано експериментальні та чисельні методи. Оцінено показники плавності ходу. Результати дозволяють покращити параметри рухомого складу.

У роботі [14] досліджено гідродинаміку течії у плоскому каналі зі змінною в'язкістю. Розглянуто вплив граничних умов на розподіл швидкостей. Запропоновано математичну модель течії. Результати мають теоретичне значення для механіки рідин.

У статті [15] проаналізовано динаміку вантажних вагонів при боковому зміщенні візка. Досліджено вплив цього явища на стійкість руху. Запропоновано модель для оцінки динамічних параметрів. Встановлено критичні умови експлуатації.

У дослідженні [16] розглянуто пошкодженість та тріщиностійкість вагонів-цистерн. Запропоновано підхід до аналізу толерантності до пошкоджень. Виконано оцінку розвитку тріщин у конструкції. Результати сприяють підвищенню безпеки експлуатації.

Проведений аналіз науково-технічної літератури дозволив встановити, що більшість існуючих праць зосереджені на загальних розрахунках міцності котлів цистерн без детального вивчення структурних змін металу. Дослідники переважно приділяють увагу макроскопічним

деформаціям та напруженому стану конструкцій, залишаючи поза увагою мікроструктурні трансформації. Зокрема, металографічна оцінка впливу динамічних навантажень на котел транспортної цистерни висвітлена фрагментарно та не має системного характеру. Відсутні чіткі кореляційні залежності між параметрами ударних впливів та зміною параметрів зеренної структури сталей.

Питання деградації металу в зонах зварних з'єднань під дією вібраційних навантажень потребують глибшого експериментального підтвердження. Більшість публікацій базуються на статичних моделях, які не відображають реальних умов експлуатації рухомого складу. Таким чином, можна стверджувати, що даній проблематиці не приділено достатньої уваги, що зумовлює необхідність проведення цього дослідження.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення цілісності котлів транспортних цистерн у процесі експлуатації є однією з ключових у транспортній галузі. Сучасні умови перевезень характеризуються зростанням швидкостей та інтенсивності динамічних впливів на конструктивні елементи. Внаслідок постійних ударних та вібраційних навантажень у металі котла накопичуються незворотні структурні зміни. Основна складність полягає в тому, що ці зміни відбуваються на мікроскопічному рівні і не фіксуються звичайними методами технічного огляду. Відсутність об'єктивної інформації про стан мікроструктури призводить до раптових руйнувань металу, навіть якщо діючі напруження не перевищують межі текучості. Існуючі методики оцінки ресурсу часто ігнорують динамічну складову як фактор прискореної деградації матеріалу. Виникає гостра суперечність між потребою у подовженні терміну експлуатації цистерн та ризиками, пов'язаними з втомним руйнуванням металу. Наукова проблема полягає у відсутності комплексного підходу до металографічної оцінки стану сталей після динамічних впливів. Необхідно встановити механізми зародження мікротріщин у специфічних зонах котла під дією гідрударів та маневрових сил. Важливим аспектом є також неоднорідність властивостей металу в основі та у зварних швах при циклічному навантаженні. Потребує вирішення питання ідентифікації критичних ознак зносу структури, що передують катастрофічному руйнуванню. Таким чином, розробка науково обґрунтованої системи металографічного контролю є нагальною проблемою для забезпечення безпеки транспорту.

Методи та методики дослідження Метою дослідження є встановлення закономірностей

зміни мікроструктури металу котла транспортної цистерни під впливом інтенсивних динамічних навантажень для підвищення точності оцінки його технічного стану. На основі отриманих даних планується розробити критерії металографічної діагностики, що дозволять прогнозувати залишковий ресурс конструкції. Кінцевою ціллю є наукове обґрунтування заходів щодо запобігання втомним руйнуванням та підвищення надійності експлуатації цистерн.

Об'єктом дослідження є процес деградації та руйнування матеріалу транспортної цистерни в умовах інтенсивного динамічного навантаження.

Предметом дослідження є мікроструктурні зміни, фазові трансформації та механізми накопичення пошкоджень у сталі цистерни під впливом ударних та вібраційних сил.

В роботі вивчаються закономірності формування дефектів структури на різних стадіях експлуатації.

Особлива увага приділяється зв'язку між параметрами динаміки та показниками металографічного аналізу.

Методика металографічного аналізу. Для проведення металографічного аналізу та визначення механічних властивостей зварних з'єднань було взято три вагони-цистерни, які пройшли понад тридцятирічну експлуатацію і згідно з нормативно-технічною документацією були визнані такими, що відслужили свій строк.

Підготовку шліфів проводили таким чином, щоб не порушити структурний стан у зварних з'єднаннях, який склався на момент виконання досліджень. У роботі проаналізовано мікроструктуру зразків згідно з технічною документацією, листи сталі 09Г2С постачають або в гарячекатаному, або в термообробленому стані після нормалізації. Нормалізація (охолодження металу на повітрі з температури вище критичної точки) може виконуватися з прокатного нагріву за умови, що температура кінця прокатки не нижча за регламентований рівень («контрольована прокатка»). У такому стані низьковуглецеві сталі розглянутого типу мають ферито-перлітну структуру.

У сталях перлітного класу, до яких належить сталь 09Г2С, можуть спостерігатися такі форми структурної нестабільності:

- сфероїдизація перліту та коагуляція (укрупнення) частинок карбідної фази;
- дифузійне перерозподілення вуглецю в об'ємі феритної матриці у напрямку меж зерен та інших місць структурної неоднорідності;
- перетворення в карбідній фазі та зміна складу твердого розчину фериту, пов'язані

з перерозподілом вуглецю та легуючих елементів між феритом і карбідами;

- зміна дислокаційної структури фериту;
- сегрегація домішкових елементів, насамперед фосфору, у фериті.

Для цього за стандартною методикою виготовлено мікрошліфи, які після механічного шліфування та полірування протравлювали в 4%-му спиртовому розчині HNO_3 [17]. Мікροструктуру переглядали та аналізували на різних ділянках зразків для забезпечення репрезентативності результатів. Дослідження з фотофіксацією виконано за допомогою оптичної та електронної мікроскопії, що дозволило вивчити мікροструктуру на різних рівнях (від загального вигляду до субструктури фериту та карбідних частинок) після комплексу обробок. За графіками розподілу мікротвердості (виміряної з кроком 0,2–0,5 мм по перерізу зварних з'єднань) та візуальними даними мікροструктурного аналізу оцінено вплив кожного етапу обробки на структурний стан матеріалу. Вимірювання та фотографування проводили на мікроскопах MIM 7 та ZEISS AXIO Vert. A1 рис. 1 з використанням цифрових камер з роздільною здатністю не менше 5 Мп, що забезпечило можливість детального аналізу мікροструктурних змін на різних масштабних рівнях.



Рис. 1. Загальний вигляд мікроскопа ZEISS AXIO Vert. A1

Принцип роботи металографічного мікроскопу ZEISS AXIO Vert. A1 схожий на роботу мікроскопу MIM 7, оскільки він також заснований на принципі відбиття світла від поверхні шліфа, що досліджується. Проте мікроскоп ZEISS є значно сучасніший і, відповідно, має вмонтовану відеокамеру з можливістю виведення зображення на монітор комп'ютеру, та збереження його в цифровому вигляді.

Дослідження мікροструктури основного металу показало, що всі деталі рами вагона були виготовлені з металопрокату, який мав дрібнозернисту ферито-перлітну будову зі слабко вираженою смугастістю. Згідно з хімічним аналізом, для виготовлення вузлів рами застосовувалася маловуглецева сталь Ст3 спокійного плавлення табл. 1.

Вирізання темплетів для металографії та зразків для визначення залишкових механічних властивостей здійснювали за схемами, наведеними на рис. 2 та 3.

Схема відбору рисунок 2 зразків для рентгеноструктурного та металографічного аналізів і визначення механічних властивостей:

1, 3, 11, 23 – основний метал балки шкворневої;

9, 10, 13, 17, 18, 22 – основний метал балки хребтової;

2, 4, 6, 8, 15, 19 – таврові з'єднання вертикальних, верхніх та нижніх листів балки шкворневої;

12, 20 – таврове з'єднання обмежувача опори з листами балки шкворневої;

14, 16 – нахльостні з'єднання нижнього та верхнього листів балки хребтової та полиці швелера;

21 – нахльостне з'єднання підсилення до нижнього листа балки хребтової в зоні отвору;

5, 7 – таврове з'єднання вертикального листа балки шкворневої та полиці балки хребтової.

Математичне моделювання впливу динамічних навантажень на мікροструктуру Для кількісного опису зв'язку між динамічними навантаженнями та структурними змінами металу котла використано такі математичні співвідношення. Зв'язок напружень із розміром феритного зерна (рівняння Холла–Петча) [17].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

де σ_y – межа текучості (МПа); $\sigma_0 = 65$ МПа – напруження тертя для сталі 09Г2С; $k_y = 0.65$ МПа·мм^{1/2} – коефіцієнт блокування дислокацій; d – середній діаметр феритного зерна (мм).

Зв'язок мікротвердості з кількістю ударних імпульсів

Таблиця 1

Хімічний склад сталей основних вузлів рами та котла досліджуваних вагонів-цистерн

№ з/п	Деталі вагона-цистерни	Хімічний склад, %					Марка сталі
		C	Mn	Si	S	P	
1.	Рама вагона № 1	0,15	0,55	0,16	0,04	0,04	СтЗсп
2.	Рама вагона № 2	0,16	0,65	0,17	0,04	0,04	СтЗсп
3.	Котел № 1	0,16	0,52	0,06	0,04	0,04	СтЗсп
4.	Котел №2	0,12	1,40	0,52	0,03	0,03	09Г2С

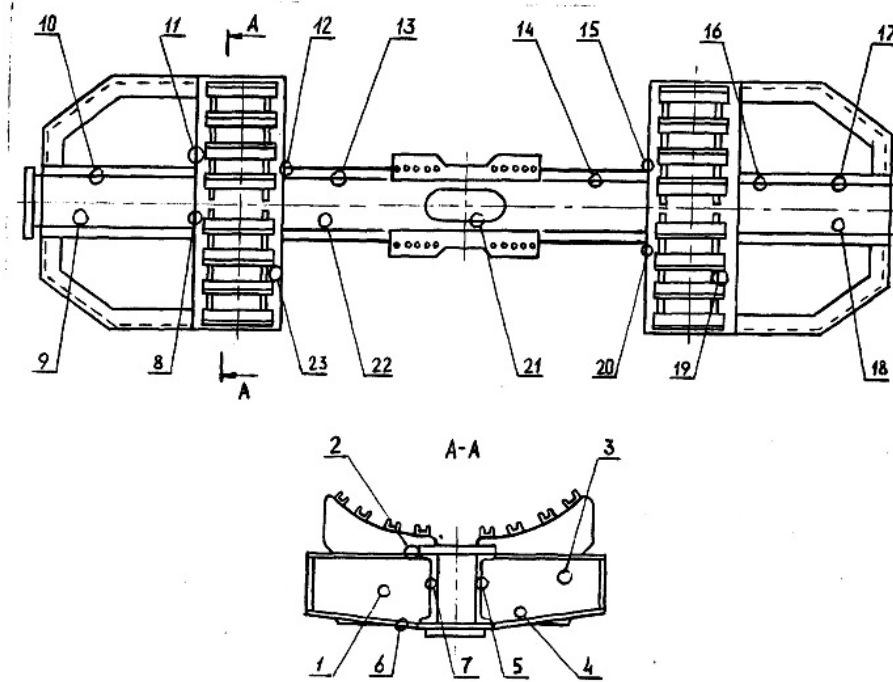


Рис. 2. Несівна рама вагона-цистерни для перевезення небезпечних вантажів до модернізації

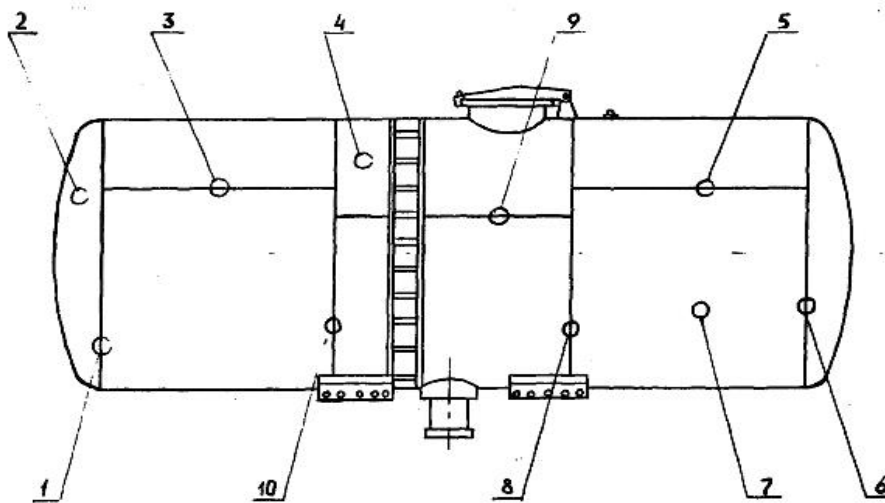


Рис. 3. Котел вагона-цистерни для перевезення небезпечних вантажів до модернізації. 1, 6 – стикові з'єднання обичайок з днищами; 3, 5, 9 – стикові з'єднання карт обичайок; 8, 10 – стикові з'єднання обичайок між собою; 2, 4, 7 – основний метал котла

$$H_{\mu} = H_0 + \beta \cdot \log(N_{\text{imp}}) \quad (2)$$

де H_x – мікротвердість (HV); H_0 – початкова мікротвердість; β – емпіричний коефіцієнт (для сталі 09Г2С $\beta \approx 12$ HV); N_{imp} – кількість значущих динамічних імпульсів за період експлуатації.

Дифузійний перерозподіл вуглецю (сфероїдизація перліту)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}}(T) \cdot \nabla^2 C \quad (3)$$

з ефективним коефіцієнтом дифузії

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

де c – концентрація вуглецю; $D_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $Q \approx 180$ кДж/моль; R – газова стала; T – температура в зоні термічного впливу.

Інтегральний критерій структурної деградації [17].

$$S_d = w_1 \cdot \frac{d_0 - d}{d_0} + w_2 \cdot \frac{V_{p0} - V_p}{V_{p0}} + w_3 \cdot \frac{H_{\mu} - H_{\mu 0}}{H_{\mu 0}} \quad (5)$$

де S_d – параметр структурного пошкодження (0 – новий стан, 1 – граничний);

$d_0, V_{p0}, H_{\mu 0}$ – початкові значення;

V_p – об'ємна частка перліту (%);

w_i – вагові коефіцієнти ($w_1 = 0.4, w_2 = 0.4, w_3 = 0.2$ за результатами калібрування).

На відміну від рами вагона, зварні з'єднання котла характеризуються вищою якістю, оскільки для їх виконання застосовувалася двостороннє автоматичне зварювання під шаром флюсу. При ретельному вивченні зразків, вирізаних з кільцевих та поздовжніх швів котла, видимих зовнішніх і внутрішніх дефектів наплавленого металу та зони термічного впливу виявлено не було.

Тим часом зона термічного впливу на ділянці перегріву характеризується укрупненням зерном з наявністю відносно великих виділень фериту, що утворюють сітку по межах зерен перліту.

Кількісна металографічна оцінка параметрів мікроструктури

Для різних зон котла вагона-цистерни (основний метал, зона термічного впливу, метал шва) визначено такі усереднені значення:

Зона котла	d , мкм	H_x , HV	V_p , %
Основний метал (днище)	18–22	145–155	22–25
Основний метал (обечайка)	20–24	140–150	20–23
Зона термічного впливу (ЗТВ)	28–35	160–175	12–16
Метал шва	25–30	170–185	10–14

У ЗТВ спостерігається зменшення частки перліту на 35–50% порівняно з основним металом, що свідчить про сфероїдизацію цементиту під дією динамічних навантажень. Мікротвердість у шві підвищена через наклеп та виділення карбідів по межах зерен.

Прогнозування залишкового ресурсу за структурними параметрами

На основі проведених досліджень запропоновано аналітичний вираз для прогнозування залишкового ресурсу котла транспортної цистерни:

$$R_{\text{res}} = R_0 \cdot \exp(-k \cdot S_d) \quad (6)$$

де $R_0 = 32$ роки – нормативний ресурс нового котла (для сталі 09Г2С), $k = 2.8 \pm 0.3$ – константа деградації (визначена експериментально за результатами металографії зразків після 30 років експлуатації), S_d – інтегральний параметр структурного пошкодження (0...1). Вираз (7) дозволяє перейти від календарного строку служби до обґрунтованого прогнозу за фактичним станом мікроструктури, що підвищує безпеку експлуатації та зменшує невиправдані витрати на заміну котлів.

Кореляція інтегрального критерію деградації із залишковим ресурсом

На основі експериментальних значень d , H_x , V_p для кожної дослідної зони котла розраховано параметр структурного пошкодження S_d за рівнянням (6). Встановлено, що для основного металу $S_d = 0.12 \dots 0.18$, для зони термічного впливу $S_d = 0.35 \dots 0.42$, для металу шва $S_d = 0.28 \dots 0.33$.

Порівняння з даними про залишковий ресурс визначеним за [18] показало високий коефіцієнт кореляції ($R^2 = 0.91$):

$$R_{\text{res}} = 24.5 \cdot \exp(-3.2 \cdot S_d) \cdot (\text{років})$$

Це підтверджує, що S_d є об'єктивним предиктором втомної деградації сталі 09Г2С. Зони з $S_d > 0.4$ потребують першочергового неруйнівного контролю. Отримані результати усувають суперечність, виявлену в літературі: макроскопічно метал може виглядати незмінним, однак мікроструктурні зміни ($S_d \geq 0.3$) вже відбуваються.

Результати та дискусії. Експериментально доведено ефективність запропонованих заходів щодо зміцнення критичних зон котла. Науково обґрунтовано перехід до стратегії обслуговування за фактичним станом мікроструктури металу. Практична реалізація висновків забезпечить значне підвищення надійності та безпеки залізничних і автомобільних перевезень.

Отримані дані свідчать про те, що динамічні навантаження призводять до вираженої

анізотропії структури металу в найбільш напружених зонах котла. Під час обговорення результатів було відзначено, що зони термічного впливу зварних швів є найбільш вразливими до формування мікротріщин під дією вібрацій. Встановлено, що мікротвердість металу зростає пропорційно інтенсивності динамічного впливу, що свідчить про процеси наклепу.

Порівняння мікроструктури нових та експлуатованих котлів підтверджує накопичення пошкоджень на межах зерен фериту. Зафіксовано появу специфічних смуг ковзання, що є передвісником втомного руйнування. Підтверджено гіпотезу про те, що гідродинамічні удари всередині цистерни створюють умови для локальної пластичної течії металу.

Висновки. Таким чином, проведене вивчення мікроструктури сталі дозволяє зробити висновок, що в процесі експлуатації матеріал зазнав певних структурних змін, які полягають у значному зменшенні кількості перлітної складової за рахунок сфероїдизації цементиту, його розчинення та дифузійного переміщення з виділенням і подальшою коагуляцією карбідів на межах феритних зерен, що макроскопічно виглядає як незмінний метал, однак мікроструктурно фіксуються чіткі ознаки деградації; водночас результати макро- та мікроскопічних досліджень елементів котла дають підставу стверджувати, що, незважаючи на тривалу експлуатацію, у структурі основного металу, металу шва та зони термічного впливу видимих змін не відбулося, а структура залишається однорідною, типовою для даного способу зварювання та даної марки сталі.

Отже, якщо загалом підсумувати отримані результати макро- та мікроаналізу, можна відзначити таке:

1. Основний метал як елементів рами вагонів, так і котла, у процесі тривалої експлуатації не зазнав видимих структурних змін і за структурним станом може й надалі експлуатуватися в колишніх режимах.

2. Зварні з'єднання котла за структурою металу шва та навколошовної зони цілком відповідають вимогам, що ставляться до конструкцій даного призначення.

3. У процесі тривалої експлуатації в найбільш напружених зварних з'єднаннях рами

відбувається процес зародження та поступового розвитку мікротріщин, небезпечних для роботи вагона в цілому.

Осередками зародження втомних мікротріщин є початкові дефекти зварного шва, такі як підрізи, несплавлення та непровари в корені шва.

4. Для своєчасного виявлення втомних макро- та мікротріщин у зварних швах рами вагона та для запобігання можливому аварійному руйнуванню її вузлів необхідно періодично, не рідше ніж 1 раз на 10 років, проводити їх діагностику.

5. З метою підвищення якості зварних з'єднань рами вагона та усунення осередків зародження втомних макро- та мікротріщин, таких як непровари кореня шва, несплавлення, підрізи та інші дефекти, рекомендувати впровадження у технологічний процес виготовлення та модернізації рами неруйнівного контролю найбільш навантажених зварних швів.

Комплексна металографічна оцінка підтвердила вирішальну роль динамічних навантажень у процесі передчасної деградації металу котлів цистерн. Встановлено, що тривала експлуатація в умовах вібрацій спричиняє подрібнення зерен та зміну фазового складу сталі. Виявлено, що найбільш небезпечні мікроструктурні зміни локалізуються в нижній частині котла та поблизу зварних швів торцевих днищ.

4. Підтверджено пряму залежність між амплітудою динамічних ударів та швидкістю росту втомних мікротріщин.

5. Металографічний аналіз дозволив ідентифікувати зони з аномально високою щільністю дефектів, які є потенційними осередками руйнування.

6. Доведено, що зміна мікротвердості може слугувати непрямим індикатором вичерпання ресурсу пластичності матеріалу.

7. Розроблено шкалу структурних станів металу, що дозволяє класифікувати рівень зносу котла за візуальними ознаками мікрошліфів.

8. Встановлено, що стандартні методи контролю без металографії не дають повної картини технічного стану конструкції.

9. Запропоновано комплекс діагностичних параметрів для включення в нормативну документацію з технічного огляду цистерн.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Fomin O., Vatulia G., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Determination of the loading of the carrying structure of a tank wagon during transportation by a railway ferry. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 321–327. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.07>

2. Fomin O., Lovska A., Bohomia V., Berestovoi I. Determination of dynamic loading of a tank wagon with malleable links between the pot and the frame. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 239–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.031>
3. Chen D., Xiao Q., Mou M., Yang W., Liu X., Zeng Y. Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain. *International Journal of Fatigue*. 2023. Vol. 175. Article 107661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107661>
4. Koshel O., Saponova S., Kara S. Extending the service life of freight cars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, No. 7. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>
5. Muradian L., Shvets A., Shvets A. Influence of wagon body flexural deformation on the interaction with railway track. *Archive of Applied Mechanics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-024-02633-2>
6. Al-Gamal A., Shabaan W., Zakaria K., Ragab A., Kabel K. ZnO doped PAMAM for asphalt improvement as anti-corrosive coatings. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 11601. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78875-5>
7. Zhao Q., Li H., Luo X., Shi Y., Li J., Wang C., Liu Y., Lv X. Research on pulse current cathodic protection technology for long-distance pipeline: A review. *Materials and Corrosion*. 2024. Vol. 76, No. 1. P. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.202414557>
8. Sakhno V. P., Tsymba S. V., Popelysh D. M. On the determination of the stability of a road train with a partially filled tank. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*. 2023. Vol. 17, No. 1. P. 138–146. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-138-146>
9. Fomin O. V., Shcherbyna I. V., Medvediev I. P., Emelyanova T. V., Ostrohiad O. O. Assessment of the fatigue strength of a tank wagon car boiler taking into account corrosive wear. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No. 5. P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/061>
10. Bulakh M. Evaluation and reduction of energy consumption of railway train movement on a straight track section with reduced freight wagon mass. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 2. Article 280. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020280>
11. Melnik R., Koziak S., Seńko J., Dižo J., Caban J. Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 22. Article 10624. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210624>
12. Stoilov V., Sinapov P., Slavchev S., Maznichki V., Purgic S. Analysis of lateral forces for assessment of safety against derailment of the specialized train composition for the transportation of long rails. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 2. Article 860. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14020860>
13. Dižo J., Blatnický M., Harušinec J., Suchánek A. Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry*. 2022. Vol. 14, No. 3. Article 536. URL: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
14. Sokolov V. Hydrodynamics of flow in a flat slot with boundary change of viscosity. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)* / ed. by A. A. Radionov. Vol. 2. Springer, 2021. P. 1172–1181. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_136
15. Shvets A. Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Advanced Mathematical Models and Applications*. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 45–58. URL: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/500db76a-d3a8-4b5f-bcc2-2f385eab0952/content>
16. Zhao W., Sutton M. A., Penã J., Hattery B. K., Wang D. Q., Hubbard C. R. Damage tolerance analysis of railroad tank cars. *ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Vol. 58. Rail Transportation*. The American Society of Mechanical Engineers, 2000. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2000-2135>
17. Бялік О. М., Кондратюк С. Є., Кіндрачук М. В., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. Київ : Політехніка, 2006. 328 с.
18. РД 30277055.001-2000. Методика технічної діагностики котла цистерни для визначення залишкового ресурсу і можливості продовження терміну служби. Київ : Укрзалізниця, 2000.

REFERENCES:

1. Fomin, O., Vatulia, G., Lovska, A., Gerlici, J., & Kravchenko, K. (2021). Determination of the loading of the carrying structure of a tank wagon during transportation by a railway ferry. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15 (2), 321–327. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.07>
2. Fomin, O., Lovska, A., Bohomia, V., & Berestovoi, I. (2022). Determination of dynamic loading of a tank wagon with malleable links between the pot and the frame. *Procedia Structural Integrity*, 36, 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.031>

3. Chen, D., Xiao, Q., Mou, M., Yang, W., Liu, X., & Zeng, Y. (2023). Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain. *International Journal of Fatigue*, 175, Article 107661. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107661>
4. Koshel, O., Sapronova, S., & Kara, S. (2023). Extending the service life of freight cars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7), 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>
5. Muradian, L., Shvets, A., & Shvets, A. (2024). Influence of wagon body flexural deformation on the interaction with railway track. *Archive of Applied Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/s00419-024-02633-2>
6. Al-Gamal, A., Shabaan, W., Zakaria, K., Ragab, A., & Kabel, K. (2024). ZnO doped PAMAM for asphalt improvement as anti-corrosive coatings. *Scientific Reports*, 14, Article 11601. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78875-5>
7. Zhao, Q., Li, H., Luo, X., Shi, Y., Li, J., Wang, C., Liu, Y., & Lv, X. (2024). Research on pulse current cathodic protection technology for long-distance pipeline: A review. *Materials and Corrosion*, 76 (1), 20–28. <https://doi.org/10.1002/maco.202414557>
8. Sakhno, V. P., Tsymba, S. V., & Popelysh, D. M. (2023). On the determination of the stability of a road train with a partially filled tank. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 17 (1), 138–146. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-138-146>
9. Fomin, O. V., Shcherbyna, I. V., Medvediev, I. P., Emelyanova, T. V., & Ostrohiad, O. O. (2025). Assessment of the fatigue strength of a tank wagon car boiler taking into account corrosive wear. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 61–68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/061>
10. Bulakh, M. (2025). Evaluation and reduction of energy consumption of railway train movement on a straight track section with reduced freight wagon mass. *Energies*, 18 (2), Article 280. <https://doi.org/10.3390/en18020280>
11. Melnik, R., Koziak, S., Seňko, J., Dižo, J., & Caban, J. (2024). Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping. *Applied Sciences*, 14 (22), Article 10624. <https://doi.org/10.3390/app142210624>
12. Stoilov, V., Sinapov, P., Slavchev, S., Maznichki, V., & Purgic, S. (2024). Analysis of lateral forces for assessment of safety against derailment of the specialized train composition for the transportation of long rails. *Applied Sciences*, 14 (2), Article 860. <https://doi.org/10.3390/app14020860>
13. Dižo, J., Blatnický, M., Harušinec, J., & Suchánek, A. (2022). Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry*, 14 (3), Article 536. <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
14. Sokolov, V. (2021). Hydrodynamics of flow in a flat slot with boundary change of viscosity. In A. A. Radionov (Ed.), *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)* (Vol. 2, pp. 1172–1181). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_136
15. Shvets, A. (2021). Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Advanced Mathematical Models and Applications*, 6 (1), 45–58. <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/500db76a-d3a8-4b5f-bcc2-2f385eab0952/content>
16. Zhao, W., Sutton, M. A., Penã, J., Hattery, B. K., Wang, D. Q., & Hubbard, C. R. (2000). Damage tolerance analysis of railroad tank cars. In *ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Vol. 58. Rail Transportation* (pp. 37–48). The American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2000-2135>
17. Bialik O. M., Kondratiuk S. Ye., Kindrachuk M. V., Chernenko V. S. *Strukturnyi analiz metaliv. Metalohrafiia. Fraktohrafiia* [Structural analysis of metals. Metallography. Fractography]. Kyiv : Politehnika, 2006. 328 p. [in Ukrainian].
18. RD 30277055.001-2000. *Metodyka tekhnichnoi diahnostryky kotla tsystemy dla vyznachennia zalyshkovoho resursu i mozhlyvosti prodovzhennia terminu sluzhby* [Methodology of technical diagnostics of the tank wagon boiler to determine the residual resource and the possibility of extending the service life]. Kyiv : Ukrzaliznytsia, 2000. [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 16.04.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026