

УДК 629.4.077:629.4.027.51

**Альона Ловська<sup>1</sup>, Василь Равлюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

<sup>2</sup>Доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

\* Автор, відповідальний за листування: [ravvg@ukr.net](mailto:ravvg@ukr.net)

## **ВИЯВЛЕННЯ ПРИЧИН УТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ КОЛІС ВАГОНІВ, ОБЛАДНАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИМИ КОЛОДКАМИ**

*У роботі висвітлено результати аналізу виникнення поверхневих дефектів і несправностей коліс вантажних вагонів, що обумовлені фрикційною взаємодією з композиційними гальмовими колодками. Встановлено, що основний вплив на термомеханічну поведінку коліс вантажних вагонів спричиняють теплові навантаження, що мають місце під час гальмувань. У випадках термічних перевантажень, які виникають в основному в результаті тривалого гальмування, відбувається генерація напружень і деформацій, наслідками яких є поява високотемпературних місцевих дефектів на поверхні кочення коліс вантажних вагонів. Ці дефекти негативно впливають на безпеку руху поїздів і суттєво збільшують експлуатаційні витрати на залізничному транспорті.*

*Для визначення термонапруженого стану колеса вантажного вагона під час гальмування проведено його розрахунок. В якості розрахункового застосований метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Визначено допустимий з точки зору забезпечення міцності колеса температурний вплив на нього під час гальмування.*

*Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо керування температурним впливом на колесо, а також підвищенню безпеки руху поїздів і суттєвому зменшенню експлуатаційних витрат на залізничному транспорті.*

**Ключові слова:** вантажний вагон, гальмова колодка, дефекти колеса, міцність колеса, термонапружений стан.

**Вступ.** Потреба в зниженні експлуатаційних витрат в умовах конкуренції на ринку транспортних послуг висуває вимоги стосовно до організації системи технічного обслуговування та ремонту вантажного рухомого складу, виходячи з фактичного стану його працюючих вузлів [1, 2]. Тому для оцінки технічного стану вузлів рухомого складу потрібен постійний моніторинг, особливо за тими, які є відповідальними за безпеку руху поїздів. Одним з таких вузлів вантажних вагонів є триботехнічна пара «гальмова колодка – колесо».

Зниження зносу в системі «гальмова колодка – колесо» значно зменшує експлуатаційні витрати і є одним з пріоритетних напрямків підвищення ефективності роботи залізничного транспорту, в тому числі забезпечення екологічності перевезень, а також безпеки руху поїздів. Таким чином, проблема взаємодії в системі «гальмова колодка – колесо» є на даний час актуальною та важливою.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** У проявах функціонування системи «гальмова колодка – колесо» відбулися значні зміни, які пов'язані з інтенсифікацією вантажообігу на території України, що почалося в 90-ті рр. минулого століття і тривають по нині. Зростання швидкості руху вантажних і пасажирських поїздів [3], збільшення осьового навантаження вагона (до 25 кН і вище) призвело до потреби зростання необхідної потужності гальмування і підвищення температури в зоні контакту пари тертя «гальмова колодка – колесо», що в цілому негативно вплинуло на поверхні кочення коліс рухомого складу, збільшивши частоту появи дефектів, що утворюються за рахунок високотемпературних впливів [4].

Поряд з цим зросла інтенсивність зносу вказаної системи. Тому в даний час зміна умов її експлуатації вимагає розроблення і застосування інноваційних фрикційних матеріалів з урахуванням роботи системи – «гальмова колодка – колесо – рейка».

На залізничному рухомому складі використовуються колеса, які поділяються: за типами коліс – суцільнокатані колеса й бандажні; за способом виготовлення – суцільнокатані та литі; залежно від використання гальмового обладнання – колісна пара з гальмовим диском (або декількома дисками); жорстко закріплені на осі; типова колісна пара, призначена для застосування у візках з натисненням гальмових колодок на поверхню кочення колеса; колісні пари з розташованими на бокових поверхнях колеса гальмовими дисками [5].

У роботі [6] автор наводить відомості, які стверджують, що під час перекочування коліс по рейках вони сприймають великі контактні й ударні навантаження, тертя від зіткнення з рейками та гальмовими колодками. Тому, під час контакту колеса з рейкою по плямі контакту малої площі, на колесо передаються значні статичні й динамічні навантаження. В результаті в зонах контакту коліс з рейками виникають контактні напруження (1-1,5 ГПа) [7-9]. У процесі гальмування між колесами і колодками виникають сили тертя, які викликають нагрівання в зоні триботехнічних пар, що сприяє утворенню на поверхнях кочення коліс різного виду дефектів, зокрема, вищербин, термотріщин, раковин тощо [4].

У праці [10] зазначено, що при виникненні на поверхні кочення колеса дефекту, в тому числі термомеханічного походження, величина ударних навантажень збільшується залежно від швидкості руху та розміру дефекту. Розглянуто проблему виникнення дефектів односторонніх повзунів, що виникають в основному при відчепленні та розпуску вагонів з сортувальних гірок за використання башмачного гальмування. Тепло, що виділяється під час руху в зоні контакту «башмак – рейка», дуже сильно нагріває полоз башмака, а це в свою чергу збільшує теплове навантаження на контакт «колесо - полоз» і дуже часто призводить до зміни коефіцієнта тертя.

У роботі [11] розглянуто деякі причини появи дефектів поверхні кочення коліс вагонів, які виникають в результаті незлагодженої роботи гальмової системи вагона. Однак, автором не наводяться відповідні розрахунки, які б могли підтвердити його припущення. У публікації [12] наведено можливі способи для підвищення міцності поверхні кочення колеса і попередження утворень вищербин, наприклад, легування сталі й збільшення за рахунок різних термічних обробок обода – границі витривалості й часового опору матеріалу. Однак визначенню термонапруженого стану колеса з урахуванням запропонованих рішень в роботі не приділялося уваги.

У проаналізованих закордонних працях виконано безліч досліджень тягових характеристик поїздів щодо можливостей прогнозування теплового перевантаження коліс, особливо під час тривалого гальмування на дільницях де колія має значні ухили. На основі таких досліджень [13-16], Європейський залізничний науково-дослідний інститут (Нідерланди) запропонував процедуру оцінки, кінцевою метою якої є прийняття рішення щодо вживання спеціальних заходів для запобігання виникненню теплового перегріву поверхонь кочення коліс. Це передбачає застосування регулювання швидкості руху поїзда за рахунок виконання ступеневого гальмування або інших заходів, пов'язаних зі зміною режимів гальмування. Однак, запропонована процедура, яка передбачає розрахунок коефіцієнта для конкретної оцінки, не забезпечує ефективного та надійного використання його у всіх потенційних випадках, особливо

у тих, що стосуються затяжного гальмування, яке відбувається на крутих спусках, що мають значний ухил колії.

У праці [17] наведено результати термічного аналізу щодо досліджень гальмових систем залізничного рухомого складу з колодковими блоковими гальмами. Виконувалося аналітичне та чисельне моделювання теплових процесів, що відбуваються у колесі під час тривалого ступеневого гальмування, яке дає змогу підтримувати постійну швидкість руху поїзда на залізницях зі значними ухилами. Однак, у роботі виконано дослідження тільки для локомотивів з колодковими блоковими гальмами.

Так само результати багатьох досліджень, що приведені в роботах [13, 15, 18-20], підтвердили домінуючий вплив теплових навантажень над механічними, а також зареєстровані залишкові напруження, які викликані високими тепловими навантаженнями в суцільнометалевому колесі з блоковим гальмом [21, 22]. Тому важливо з високою точністю визначити температурне поле гальмової системи, а також підкреслити, що високі теплові навантаження, інакше кажучи, перевантаження, колеса дуже часто виникають в результаті тривалого гальмування або виникнення небажаного явища «юза».

Із виконаного огляду літературних джерел необхідно зазначити, що проблемам, пов'язаних з утворенням дефектів від високих температур на поверхнях кочення коліс від їх взаємодії з композиційними гальмовими колодками у процесі експлуатації вантажних вагонів, досі належної уваги не приділялося. Це зумовлює необхідність проведення досліджень в зазначеному напрямі.

**Мета і завдання дослідження.** Метою статті є висвітлення результатів дослідження причин утворення поверхневих дефектів коліс від їх взаємодії з композиційними гальмовими колодками.

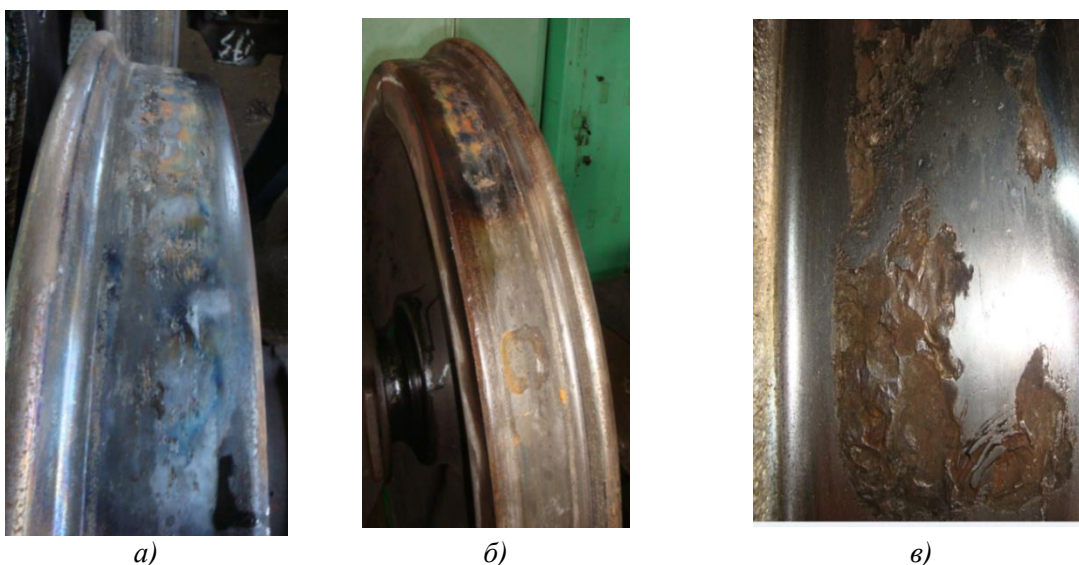
Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- дослідити причини виникнення поверхневих дефектів коліс вантажних вагонів;
- систематизувати найбільш небезпечні дефекти коліс вантажних вагонів при взаємодії з композиційними гальмовими колодками;
- провести визначення термонапруженого стану колеса при взаємодії з композиційною колодкою під час гальмування.

**Матеріали та методи дослідження.** Слід зазначити, що зараз у вантажних вагонах застосовуються гальмові колодки з полімерних композитів, які на відміну від чавунних мають значну економічну ефективність. Необхідно звернути увагу і на те, що під час застосування чавунних колодок на нагрівання колеса припадає близько 70 % потужності гальмування, а за використання композиційних – 95÷98 % [12, 23]. Проте, незважаючи на меншу вартість виготовлення, чавунні колодки мають ряд суттєвих недоліків. Наприклад, при застосуванні чавунних колодок у вантажному рухомому складі, які на жаль є недовговічними й мають незначний ресурс, який становить 30-50 тис. км. Так само для поїздів, які рухаються до швидкості 120 км/год суттєво знижується коефіцієнт тертя, що негативно впливає на гальмову ефективність поїздів [24 - 26]. Тому нинішнє застосування композиційних гальмових колодок, які є більш довговічні (до 160 тис. км) і мають майже сталий коефіцієнт тертя у великому діапазоні швидкостей є значною перевагою перед чавунними. Також в результаті застосування композиційних гальмових колодок відбувається збільшення швидкостей руху поїздів до 140-160 км/год, що призводить до більш ніж двократного збільшення потужності гальмування поїздів через умови нормальної роботи елементів ГВП [27].

Однак під час застосування композиційних гальмових колодок значно зростає кількість відмов коліс у процесі експлуатації вантажних вагонів. Основною причиною виникнення таких відмов є те, що композиційні гальмові колодки мають низьку теплопровідність, а це спричиняє різні поверхневі пошкодження поверхонь кочення коліс (вищербини різного виду, навари), які мають термомеханічний характер походження (рис. 1). Так само, ще однією негативною

особливістю цих колодок є те, що під дією високих температур вони здатні вкраплювати метал колеса у робочу поверхню (тіло) композиційної колодки.



**Рис. 1. Дефекти коліс вантажних вагонів, що утворилися від композиційних гальмових колодок у результаті гальмувань**

*а) сітка термічних тріщин з вищербинами; б) вищербини за термічними тріщинами; в) вищербини від втоми*

Зараз зазвичай всі вантажні вагони обладнуються подібними за принципом дії колодковим гальмом. Основна відмінність таких гальмових систем може бути тільки в кількості гальмових циліндрів, які встановлюються на вагонах, а також в симетричності розташування елементів механічної частини гальма.

При існуючих різноманітних конструкціях гальмових систем вагонів їх об'єднує сила тертя, яка виникає під час натиснення гальмової колодки до поверхні кочення колеса. Гальмова сила, яка виникає відповідно на одному колесі вагона і притискає до нього колодки, визначається за формулою [24]:

$$B_{\Gamma} = F_{mp} - F_i, \quad (1)$$

де  $F_{mp}$  – сила тертя, яка виникає між гальмовою колодкою і колесом вагона;  $F_i$  – сила інерції, що виникає при сповільненні руху колеса.

Сила тертя залежить від зусилля натискання колодки на колесо і трибологічних характеристик контактуючих матеріалів (коефіцієнта тертя):

$$F_{mp} = K\varphi_k, \quad (2)$$

де  $\varphi_k$  – дійсний коефіцієнт тертя гальмової колодки.

Значенням зусилля  $K$ , яке передається через вертикальний двоплечий важіль та спонукає притиснення гальмової колодки до колеса, можна визначити за такою залежністю [24]:

$$K = \left(250\pi d_u^2 P_u \eta_u - F_1\right) \frac{a}{a+b} \eta, \quad (3)$$

де  $d_c$  – діаметр гальмового циліндра;  $P_c$  – тиск повітря в гальмовому циліндрі;  $\eta_c$  – коефіцієнт корисної дії гальмового циліндра;  $F_1$  – зусилля відпускнуї пружини;  $a, b$  – довжини плечей двоплечого важеля;  $\eta$  – коефіцієнт силових втрат ГВП вагона.

Аналіз даних залежностей показує, що на створення гальмової сили під час гальмування поїзда безпосередній вплив надає коефіцієнт тертя контактуючих поверхонь.

Питомий тиск, який створюється гальмовою колодкою на колесо під час гальмування, буде таким:

$$q = \frac{K \cdot 10^3}{F_k}, \quad (4)$$


де  $F_k$  – площа поверхні тертя гальмової колодки, см<sup>2</sup>.



У результаті збільшення сили натиснення на композиційну гальмову колодку, буде зростати питомий тиск у вузлі триботехнічної пари «гальмова колодка – колесо». Тому в тих колодках, які мають вкраплини частинок металу буде відбуватися пошкодження поверхні кочення коліс, що негативно впливає на безпеку руху поїздів і суттєво збільшує експлуатаційні витрати.



Основними чинниками, що впливають на термін служби суцільнокатаного колеса вантажного вагона, є співвідношення твердостей колеса та рейки, а також значення сумарних внутрішніх напружень, що виникають через вплив у результаті експлуатації, як нормальних статичних, так і знакозмінних динамічних навантажень, які діють у радіальному та осьовому напрямках, також і температурних напружень, що спричинені тертям гальмових колодок об обід колеса в процесі гальмування рухомого складу.



Основні дефекти й несправності суцільнокатаних коліс, що виникають у процесі експлуатаційних вантажних вагонів наведені в таблиці 1 [25, 26].

**Таблиця 1. Види поверхневих дефектів і несправностей коліс, які виникають внаслідок фрикційної взаємодії з композиційними гальмовими колодками вагонів**




№	Код	Несправність	Причини виникнення	Спосіб усунення	Рисунок
1	2	3	4	5	6
1 Зноси					
1	10	Рівномірний прокат – рівномірний круговий граничний знос колеса по колу кочення	Природний знос металу, що утворюється за рахунок деформації та стирання під час фрикційній взаємодії колеса з рейкою та з гальмовою колодкою	Якщо величина прокату більше допустимих значень, потрібно виконати відновлення профілю поверхні кочення на колісотокарному верстаті	

№	Код	Несправність	Причини виникнення	Спосіб усунення	Рисунок
2	11	Нерівномірний прокат – нерівномірний знос колеса по колу кочення, що має форму, відмінну від круглої	Неоднорідність властивостей металу на поверхні кочення колеса, до якої призвели значні теплові та механічні впливи під час гальмування або розвитку поверхневих дефектів	Якщо величина прокату більше допустимих значень, потрібно виконати відновлення профілю поверхні кочення на колісотокарному верстаті	
3	13	Кільцеві виробки – нерівномірний по поверхні кочення колеса круговий знос і деформація, що спричиняють місцеві поглиблення	Утворюються на краях зони контакту поверхні кочення з гальмовою колодкою, і ця закономірність їх появи пояснюється неоднаковими термічними умовами роботи поверхневих шарів металу колеса й композиційної колодки за шириною зони контакту й впливом абразивних частинок пилу (металічних включень) на поверхню тертя по краях колодки	Виконати відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	

2 Термомеханічні пошкодження					
4	20	Повзун – локальний знос поверхні кочення колеса, що характеризується утворенням плоского місця на поверхні кочення глибиною більше допустимої	Ковзання колеса по рейці, що спричиняє деформацію та місцевий знос через заклинювання колісної пари гальмовими колодками (явище «юз»), внаслідок неправильної роботи пневматичного гальмового обладнання рухомого складу. Так само повзун може виникати в результаті заклинювання гальмовим башмаком колеса, що спостерігається під час виконання маневрових робіт	Якщо глибина повзуна більше граничного значення, необхідно виконати відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	
5	21	Навар – зміщення металу на поверхні обода колеса, що характеризується утворенням зсувів металу U- подібної форми та висотою більше допустимих значень	Інтенсивна пластична деформація металу при короткочасному заклинюванні або «юзі» коліс в експлуатації	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	

32	Сітка термічних тріщин в ободі – порушення суцільності металу у вигляді паралельних похилих термічних тріщин від утоми за периметром поверхні кочення колеса	Циклічне нагрівання колеса в результаті взаємодії з гальмовою колодкою під час гальмування з послідуочим охолодженням	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса	
3 Руйнування у вигляді викришування металу та відколу окремих частин				
22	Вищербини – ділянки поверхні кочення, що викришилися більше допустимих розмірів або в разі наявності в них тріщин чи розшарувань, які йдуть в глиб			
22.1	– вищербини за світлими плямами, повзунах, «наварях» на поверхні кочення обода колеса – місцеве руйнування у вигляді викришування металу поверхні кочення	Викришування ділянок поверхні кочення, що утворюється в результаті загартування металу під час ковзання заклиненних колісних пар рейками	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	



	22.2	– вищербини від угоми на поверхні кочення обода колеса	Вищербини за втомними тріщинами внаслідок вичерпання металом запасу пластичності та накопичення втомних пошкоджень	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	 
	22.3	– вищербини за термічними тріщинами на поверхні кочення обода колеса	Утворення термічних мікротріщин на поверхні кочення обода колеса в результаті багаторазово повторюваних нагрівань і охолоджень під час гальмування з подальшим зростанням та об'єднанням мікротріщин під дією контактних навантажень з подальшим викришуванням металу	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	

Якщо ретельно проаналізувати табл. 1, тоді можна побачити, що в результаті теплової й механічної взаємодії фрикційної пари «гальмова колодка – колесо» у процесі експлуатації вантажних вагонів виникають різного виду несправності й дефекти на поверхні кочення колісної пари, які суттєво впливають на безпеку руху поїздів.

Для аналізу несправностей та дефектів коліс вагонів, які виникають тільки в результаті фрикційної взаємодії коліс з гальмовими колодками, виконувалися виробничі дослідження на базі вагоноремонтних підприємств, що спеціалізуються на ремонті вантажних вагонів. У результаті досліджень було обстежено 12072 коліс вантажних вагонів. Під час досліджень вивчали форми ВУ-53 для виявлення відповідних несправностей та дефектів коліс вантажних

вагонів. За результатами статистичного оброблення зібраного матеріалу, побудовано гістограму розподілу несправностей і дефектів коліс у відсотковому відношенні (рис. 2).

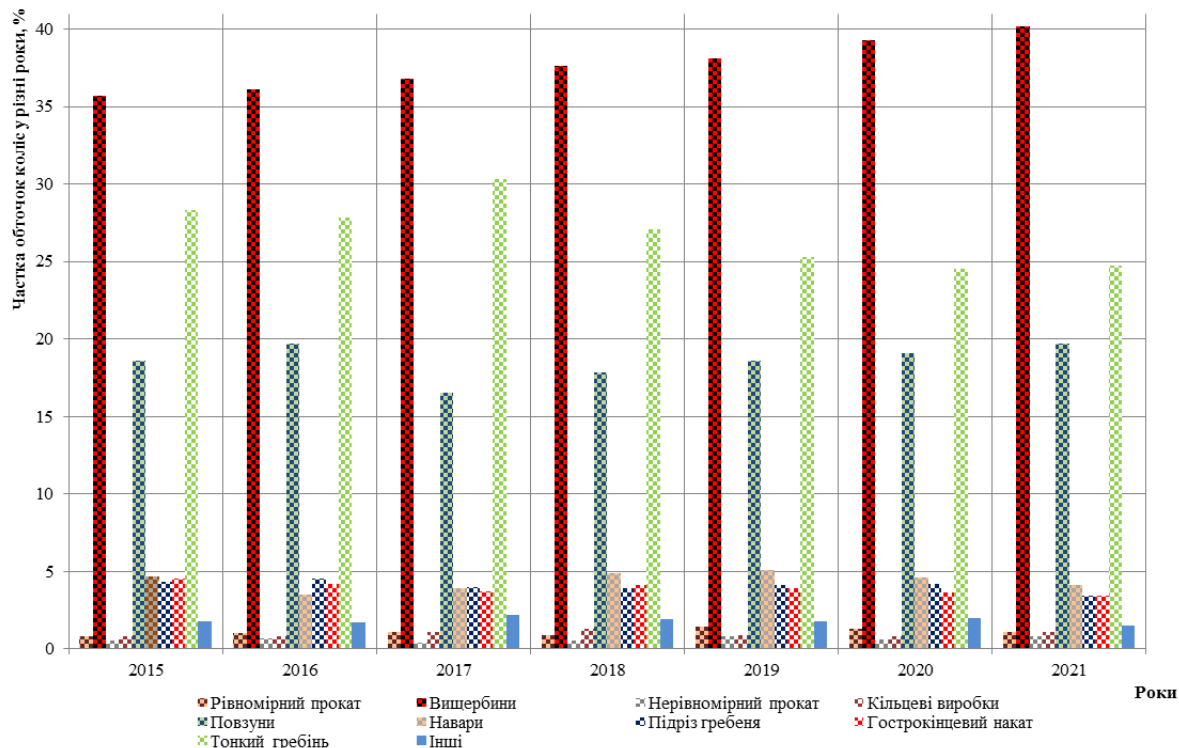


Рис. 2. Несправності та дефекти коліс вантажних вагонів, що призвели до відмов у процесі їх експлуатації

Аналіз даної гістограми про відмови коліс у процесі експлуатації за 2015–2021 рр. (рис. 2), свідчить про те, що найбільший відсоток дефектів поверхонь кочення коліс припадає на вищербини. Причому останніми роками ця величина лише збільшувалася (з 35,7 до 40,2 %). Наступну позицію займає такий вид несправності, як тонкий гребінь, який за період, що досліджувався майже знаходився в однаковому діапазоні (з 28,3 до 24,7 %). Так само на передові місця увійшли дефекти, які виникають від фрикційної взаємодії колодок з колесами – повзуни, навари. Ці дефекти також знаходилися в майже незмінному діапазоні (з 18,6 до 19,7 %) [28].

Процес утворення вищербин на поверхні кочення коліс вагонів має контактно-утомну природу походження, він являє собою появу та розходження тріщин. У зв'язку з цим розглянемо експлуатаційні чинники, які призводять до виникнення вищербин.

За способом вищербин, які виникають в процесі експлуатації вантажних вагонів їх можна класифікувати на такі види, що з'являються:

внаслідок тертя композиційної гальмової колодки об поверхню кочення колеса вантажного вагона під час ступеневого, службового та екстремного гальмування;

внаслідок тертя поверхні кочення колеса вагона об рейку під час гальмувань рухомого складу;

в результаті високих і часто повторюваних механічних навантажень в зоні контакту колеса вагона з рейкою.

До першого виду вищербин, належать процеси, що спричиняють тертя композиційних гальмових колодок об поверхню кочення коліс. Майже все тепло (приблизно 95÷98 %), що

виділяється під час ступеневого, службового та екстремного гальмувань, розсіюється самим колесом і лише 3-5 % відводиться колодкою. Під час такого фрикційного процесу можна спостерігати одночасну дію циклічно змінних навантажень і температури, що призводить до виникнення тріщин у випадку, якщо колесо має недостатню циклічну міцність під дією механічних і теплових навантажень.

До основних причин утворення *вищербин другого виду*, які пов'язані з появою дефектів від дії композиційних гальмових колодок на поверхні кочення через процеси, що відбуваються в зоні контакту системи «колесо – рейка». Коли колесо ковзає по рейці (йде «юзом») навіть з невеликою відносною швидкістю, енергія тертя, що виділяється в місці ковзання, переходить у тепло, за рахунок цього температура контактного шару значно зростає. Завдяки такому явищу поверхня кочення колеса вагона зазнає структурного перетворення, що супроводжується значним підвищенням твердості й крихкості поверхневого шару [29]. Сталь з такими механічними властивостями швидко розтріскується під впливом циклічних навантажень і відколюється від колеса [30].

*До третього виду належать вищербини*, формування яких залежить від виникнення й зростання втомних тріщин. За рахунок впливу великих навантажень, що багаторазово повторюються, в зоні контакту з рейкою (наприклад, різного роду ударні впливи) відбувається одночасне зародження втомних тріщин на поверхні колеса рухомого складу та в місцях підвищених напружень на глибині від 2 до 6 мм від поверхні кочення. Якщо експлуатація буде продовжуватися розвиток тріщин призводить до їхнього об'єднання, а в подальшому до появи вищербин.

В основному вищербини можуть з'явитися на місці повзунів, і як правило розташовуються симетрично на одній лінії у обох коліс. Однак, у процесі гальмування вантажного вагона або відцепу за допомогою башмака під час розформування вантажного рухомого складу на сортувальній станції можуть утворитися вищербини на одному колесі за рахунок проковзування колеса на гальмовому башмаку.

Привертає до себе увагу той факт, що частка пошкоджень і дефектів поверхонь кочення коліс – вищербинами в загальній кількості відмов з 2015 до 2021 рр. (рис. 2) дещо збільшилася й залишається стабільною протягом останніх років. Відповідно до [25] виділяють три види вищербин: 22.1, 22.2, 22.3 (табл. 1).

Необхідно пам'ятати, що вагомим чинником під час вибору марки сталі для виготовлення колеса, може виникнути небезпека появи термічних пошкоджень внаслідок дії композиційних гальмових колодок на поверхню кочення або ковзання колеса по колії. Під час гальмування вантажного рухомого складу, що в основному багаторазово повторюється й відносно за великих швидкостей руху варто враховувати, що сталі з високим вмістом вуглецю більш схильні до утворення термічних тріщин, ніж сталі з меншим вмістом вуглецю. Однак слід зазначити, що сталі з більш високим вмістом вуглецю мають більш високу міцність і зносостійкість [5].

З метою визначення температурного впливу від композиційної гальмової колодки на колесо проведено дослідження його термонапруженого стану.

Для цього побудовано просторову модель колеса вантажного вагона (рис. 3 а). Графічні роботи здійснено в програмному комплексі SolidWorks.



**Рис. 3. Суцільнокатане колесо візка вантажного вагона**  
а) просторова модель; б) скінчено-елементна модель

Розрахунок реалізовано за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation. В якості розрахункового застосовано критерій Мізеса. Скінчено-елементну модель (СЕМ) колеса утворено просторовими ізопараметричними тетраедрами з чотирма точками Якобіана (рис. 3, б).

Оптимальну кількість елементів СЕМ визначено графоаналітичним методом [31]. СЕМ колеса налічує 6342 вузлів та 25889 елементів. Максимальний розмір елемента дорівнює 75 мм, а мінімальний – 15 мм. Співвідношення збільшення розміру елемента 1,8. Кількість елементів в колі – 1,6.

Матеріал колеса – сталь, яка має лінійні ізотропні властивості. Основні фізико-механічні властивості матеріалу суцільнокатаного колеса зведено до таблиці 2.

**Таблиця 2. Основні фізико-механічні властивості матеріалу колеса**

Найменування параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	$2,1 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуасона	0,3
Масова щільність матеріалу, кг/м <sup>3</sup>	7850
Межа міцності, МПа	900–1100
Межа плинності, МПа	800
Коефіцієнт теплового розширення, град <sup>-1</sup>	$11,9 \cdot 10^{-6}$
Теплопровідність, Вт/м·град	43

При складанні розрахункової моделі колеса враховано, що воно навантажується зусиллям від композиційної гальмової колодки, яке відповідає середньому режиму роботи повітророзподільника ум. №483-000 і складає 35 кН [32]. Для моделювання зони прикладення зазначеного навантаження до колеса на нього встановлювалися накладки, геометрія яких ідентична до геометрії робочої поверхні колодки (рис. 4).



Рис. 4. Моделювання навантаження колеса під час гальмування  
а) робоча поверхня колодки; б) розміщення накладок на колесі

Розрахункова схема колеса враховує такі силові фактори: зусилля від колодки  $P_k$ , силу тертя  $P_{тр}$ , обертовий момент  $M$ , а також температурне вплив  $P_T$  (рис. 5). При цьому величина температурного впливу прийнята рівною  $400^\circ\text{C}$ . Модель не враховує силу зчеплення колеса з рейкою.

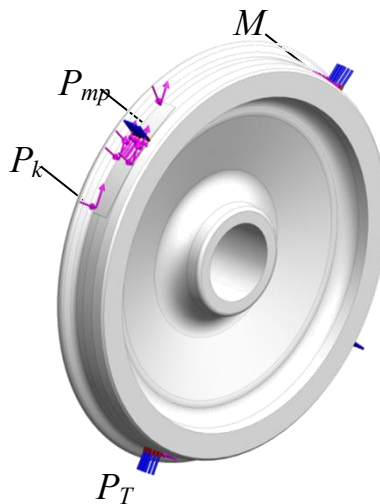


Рис. 5. Розрахункова схема колеса під час гальмування

Закріплення колеса на осі за маточину моделювалося у вигляді жорсткого защемлення.

Результати розрахунку наведено на рис. 6 і 7. Максимальні напруження зафіксовані на поверхні кочення колеса і склали  $701,9 \text{ МПа}$ , що нижче за допустимі на  $12\%$ . Допустимі напруження при цьому прийняті рівними межі плинності матеріалу, тобто  $800 \text{ МПа}$ . Отже міцність колеса забезпечується. Максимальні переміщення виникають у гребені колеса і складають близько  $0,6 \text{ мм}$ .

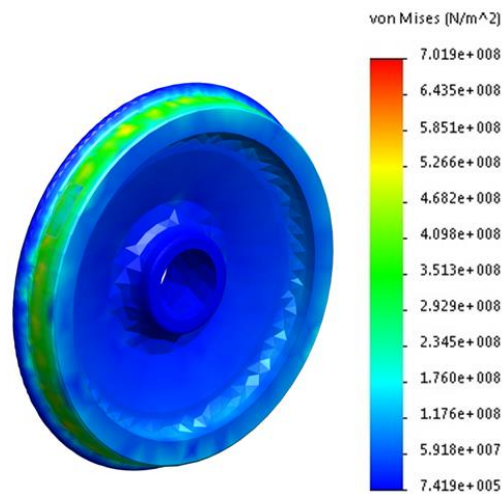


Рис. 6. Термонапружений стан колеса

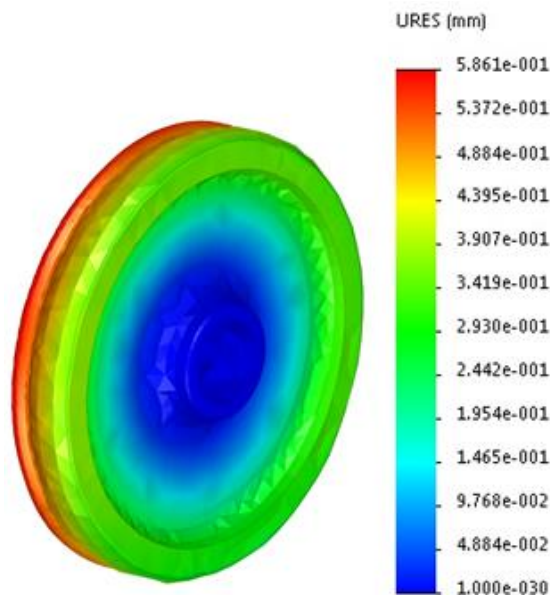


Рис. 7. Переміщення в вузлах колеса

Розрахунок проведений і стосовно інших режимів роботи повітророзподільника. При цьому навантаження від колодки на колесо при вантажному режимі роботи повітророзподільника ум. №483-000 прийнято рівним 41,69 кН, а при порожньому – 17,17 кН.

Результати розрахунку показали, що напруження в колесі при визначенні його термонапруженого стану, залежать перш за все від температурного впливу, який при всіх варіантах розрахунків був прийнятий 400°C.

Важливо сказати, що на практиці величина температурного навантаження може перевищувати 400°C, що обумовлено багатьма факторами, наприклад, технічним станом колодки або колеса, справністю повітророзподільника, завантаженістю вагона тощо. Для визначенні допустимої температури з точки зору забезпечення міцності колеса проведено варіаційні розрахунки. Результати розрахунків наведено на рис. 8.

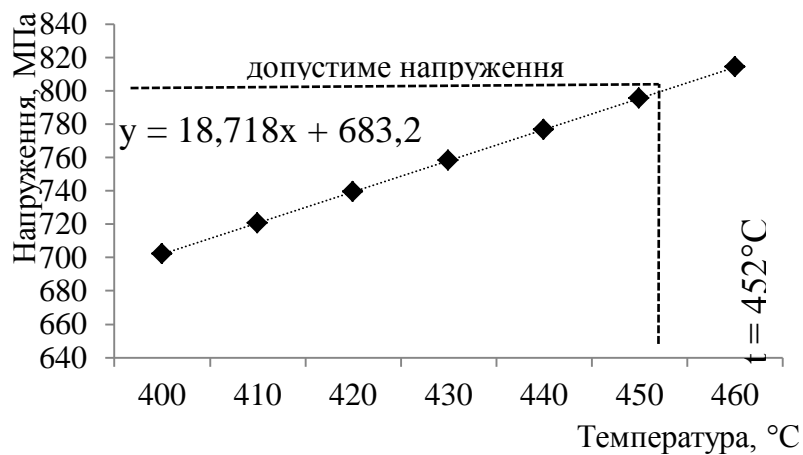


Рис. 8. Залежність напружень в колесі від температурного впливу на нього

Термонапружений стан колеса під час температурного навантаження у 452°C наведено на рис. 9.

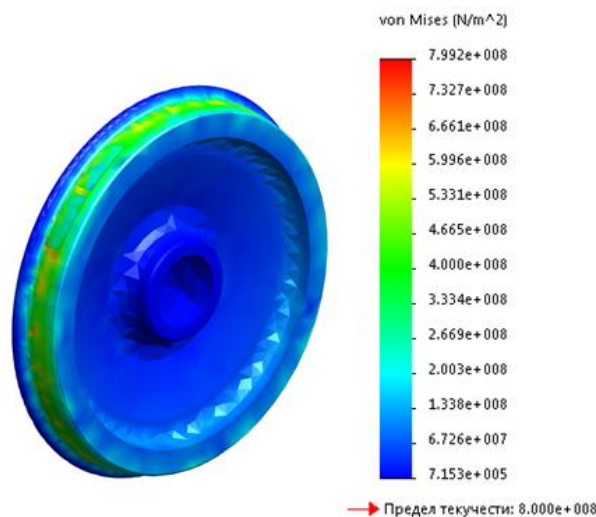


Рис. 9. Термонапружений стан колеса при температурі на поверхні гальмування 452°C

Отже для забезпечення міцності колеса важливим є дотримання температурних режимів його навантаження у експлуатації.

### Висновки

1. Проведено комплексні виробничі дослідження на базі вагоноремонтних підприємств, які спеціалізуються на ремонті вантажних вагонів, дозволили встановити види основних причини виникнення поверхневих дефектів коліс. За результатами досліджень було обстежено більше 12 тис. коліс. Отримано статистичну залежність за роками між різними видами несправностей і дефектів коліс.

2. Виконано систематизацію видів небезпечних дефектів і несправностей поверхонь кочення коліс вантажних вагонів від взаємодії композиційних гальмових колодок, що спричиняють високотемпературні місцеві пошкодження, які негативно впливають на безпеку руху поїздів.

3. Проведено визначення термонапруженого стану колеса при взаємодії з композиційною колодкою під час гальмування. Розрахунок здійснено для середнього режиму роботи повітророзподільника ум. №483-000 та величині температурного впливу на колесо у 400°C. Максимальні напруження зафіксовані на поверхні кочення колеса і склали 701,9 МПа, що нижче за допустимі на 12%.

4. Визначено допустимий з точки зору забезпечення міцності колеса температурний вплив на нього під час гальмування. Допустима величина температури на колесо склала 452°C.

5. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо керування температурним впливом на колесо, а також підвищенню безпеки руху поїздів і суттєвому зменшенню експлуатаційних витрат на утримання вантажних вагонів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol. 2(7(110)). P. 6-15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
2. Fomin O., Lovska A., Skok P., Rogovskii I. Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements. *Technology audit and production reserves*, 2021. Vol. 1(1(57)). P. 6 – 11.
3. Богданов В. М., Захаров С. М. Современные проблемы системы колесо – рельс. *Железные дороги мира*, 2004. № 1. С. 3 – 5.
4. Захарова С. М. Контакт-усталостные повреждения колес грузовых вагонов: учебник. М.: Интекст, 2004. 160 с.
5. Колісні пари вагонів магістральних залізниць колії 1520 мм (конструкція, технічне обслуговування та ремонт): Підручник для навчальних закладів залізничного транспорту / Панченко С. В. [та ін.]; під заг. ред. С. В. Панченка. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 367 с.
6. Шакина А. В. Разработка эффективной технологии получения вагонной тормозной колодки из металлокерамического фрикционного материала : дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.09. Комсомольск-на-Амуре, 2014. 159 с.
7. Абдурашитов А. Ю. Рельс с улучшенным профилем. *Путь и путевое хозяйство*, 2011. № 2. С. 5 – 10.
8. Воробьев А. А., Сорокин П. Г. Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса. *Петербургский государственный университет путей сообщения*. URL: [http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin\\_2004/vorobiev\\_issled.htm](http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin_2004/vorobiev_issled.htm).
9. Марков Д. П. Задиры боковых поверхностей рельсов и гребней колес. *Вестник ВНИИЖТ*, 2004. № 4. С. 10-13.
10. Морозкин И. С., Розман О. А., Родин А. Е., Александров А. А. Термомеханические повреждения колес вагонов и методы их устранения. *Вестник РГУПС*, 2008. № 2. С. 5-14.
11. Грищенко М. А. Причины виникнення дефектів на поверхні кочення залізничних коліс. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*, 2009. Вип. 27. С. 223–225.
12. Михайлов Е.В., Слещев В.А., Семенов С.А. Пути снижения износа гребней колес рельсовых экипажей. *Вестник Восточноукраинского национального университета имени В. Даля*, 2012. №5. С. 61–67.
13. ERRI B 169/RP 4. Standardization of coach wheelsets. Standardization of a block-braked solid wheel (rim diameter 920 mm) for coaches with a maximum speed of 160 km/h. *Standard wheelsets for block brakes*, 1993.
14. ERRI B 169/RP 5. Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs (mesures immédiates contre les ruptures des roues), 1993.
15. ERRI B 169/RP 6. Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs en service. Méthode aux ultrasons pour la détermination non destructive des contraintes résiduelles dans les jantes de roues monobloc. 1995.
16. ERRI B 169/RP 8. Standardisation des essieux. Détermination de la ténacité des roués monobloc en R7. Définition d'une méthode d'essai et d'un critère d'acceptation, 1995.
17. Milošević M., Stamenković Dušan S., Milojević A. P., Tomić M. M. Modeling Thermal Effects in Braking Systems of Railway Vehicles *THERMAL SCIENCE*, 2012. Vol. 16. (2). P. 581-592.
18. ORE B 106/RP 12. Standardization of coaches, Standardization of a block-braked solid wheel (tread diameter 920 mm) for coaches with a top speed of 160 km/h. *Basic calculations*. Utrecht 1989.
19. Jovanović R., Milutinović D. Modern Ways for Preventing the Damages Caused by the Railway Vehicle Solid Wheel Fractures (in Serbian). *VI International Scientific Conference of Railway Experts – JUŽEL*, 1999.
20. Milutinović D., Tasić M., Jovanović R. Thermal Load as a Primary Cause for the Fracture of the Block-Braked Solid Wheel. *Železnice*, 1999. №11-12.
21. UIC 510-2. Matériel remorqué. Roues et essieux montés. Conditions concernant l'utilisation des roues de différents diamètres. 3e édition 1.1, 1998.
22. UIC 812-3. Technical specification for the supply of solid (monoblock) wheels in rolled non-alloy steel for tractive and trailing stock. 5th edition 1.1, 1984.



23. Павлюков А. Э., Черепов О. В., Шалупина П. И. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы. Вестник Уральского государственного университета путей сообщения., 2017. № 4 (36). С. 4–11.
24. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. Москва: Маршрут, 2006. 392 с.
25. Класифікація несправностей вагонних колісних пар та їх елементів. – Затв. нак. Укрзалізниці № 095-Ц 15.03.2006. Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2006. 79 с.
26. Колісні пари вантажних вагонів. Правила технічного обслуговування, ремонту та формування. : СТІ 04-001:2015 : Затв. нак. Укрзалізниці №359 –Ц 25.04.15. Київ : 2015. 138 с.
27. Равлюк В. Г. Модернізація елементів гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2019. Вип. 5 (83). С. 108-121. <https://doi.org/10.15802/stp2019/182013>.
28. Аналіз стану безпеки руху в структурі АТ «Укрзалізниця» у 2019 році. Акціонерне товариство «Українська залізниця» Департамент безпеки руху. Київ : 2019. 198 с.
29. Vostrikov Ya. A., Zhatchenko V. M. Investigation of cast iron for a brake pad. II Scientific-technical and economic cooperation of the countries of the Asia-Pacific region in the XXI century, 2016. №1. P. 48-51.
30. Shakin A. V., Fadeev V. S., Shtanov O. V. Wagon brake pads of increased wear resistance. II Railway engineering, 2014. №4. P. 68-71.
31. Fomin O., Lovska A., Daki O., Bohomia V., Tymoshchuk O., Tkachenko V. Determining the dynamic loading on an open-top wagon with a two-pipe girder beam. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019. Vol. 3(7(99)). P. 18 – 25.
32. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України : ЦТ – ЦВ – ЦЛ – 0015. – Затв. нак. Укрзалізниці № 264-Ц 28.10.1997. Вид. офіц. Київ, 2004. 146 с.

## REFERENCES

1. Fomin, O., Lovska, A. (2021). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(110)), 6-15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>.
2. Fomin, O., Lovska, A., Skok, P., & Rogovskii, I. (2021). Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements, *Technology audit and production reserves*, 1(1(57)), 6-11.
3. Bogdanov, V. M., Zakharov, S. M. (2004). Sovremennye problemi sistemi koleso – rels [Modern problems of the wheel-rail system] *Zheleznie dorogi mira*, 1. 3-5 [in Russian].
4. Zakharova, S. M. (2004). Kontaktno-ustalostnye povrezhdeniya koles gruzovikh vagonov [Contact fatigue damage to the wheels of freight cars]. Moskva: Intekst [in Russian].
5. Panchenko, S. V. (2018). Kolisni pary vahoniv mahistralnykh zaliznyts kolii 1520 mm (konstruktsiia, tekhnichne obsluhovuvannia ta remont): Pidruchnyk dlia navchalnykh zakladiv zaliznychnoho transportu [Wheel pairs of wagons of main railways gauge 1520 mm (construction, maintenance and repair): Textbook for educational institutions of railway transport]. Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian].
6. Shakina, A. V. (2014). Razrabotka effektivnoi tekhnologii polucheniya vagonnoi tormoznoi kolodki iz metallokeramicheskogo friktsionnogo materiala [Development of an effective technology for obtaining a wagon brake shoe from a ceramic-metal friction material]. Komsomolsk-na-Amure [in Russian].
7. Abdurashitov, A. Yu. (2011). Rels s uluchshennim profilem [Rail with improved profile]. *Put i putevoe khozyaistvo*, 2. 5-10 [in Russian].
8. Vorobev, A. A., Sorokin, P. G. (2004). Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya pyatna kontakta kolesa i relsa [Investigation of the stress state of the wheel-rail contact patch]. *Peterburgskii gosudarstvennii universitet putei soobshcheniya*, URL: [http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin\\_2004/vorobiev\\_issled.htm](http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin_2004/vorobiev_issled.htm) [in Russian].
9. Markov, D. P. (2004). Zadir bokovikh poverkhnostei relsov i grebnei koles [Seizure of the side surfaces of the rails and wheel flanges]. *Vestnik VNIIZhT*, 4. 10-13 [in Russian].
10. Morozkin, I. S., Rozman, O. A., Rodin, A. Ye., & Aleksandrov, A. A. (2008). Termomekhanicheskie povrezhdeniya koles vagonov i metodi ikh ustraneniya [Thermomechanical damage to wagon wheels and methods for their elimination]. *Vestnik RGUPS*, 2. 5-14 [in Russian].
11. Hryshchenko, M. A. (2009). Prychyny vynyknennia defektiv na poverkhni kochennia zaliznychnykh kolis [Causes of defects on the rolling surface of railway wheels]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akad. V. Lazariana*, 27. 223–225. (in Ukrainian)
12. Mikhaylov, Ye. V., Slashchev, V. A., Semenov, S. A. (2012). Puti snizheniya iznosa grebney koles relsovykh ekipazhey [Ways to reduce wear of the ridges of the wheels of rail vehicles]. *Vestnik VNU im. V. Dalya*, 5. 61–67 [in Russian].
13. ERRI B 169/RP 4. (1993). Standardization of coach wheelsets. Standardization of a block-braked solid wheel (rim diameter 920 mm) for coaches with a maximum speed of 160 km/h. Standard wheelsets for block brakes.
14. ERRI B 169/RP 5. (1993). Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs (mesures immédiates contre les ruptures des roues).

15. ERRI B 169/RP 6. (1995). Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs en service. Méthode aux ultrasons pour la détermination non destructive des contraintes résiduelles dans les jantes de roues monobloc.
16. ERRI B 169/RP 8. Standardisation des essieux. Détermination de la ténacité des roués monobloc en R7. Définition d'une méthode d'essai et d'un critère d'acceptation.
17. Milošević, M., Stamenković, D. S., Milojević, A. P., & Tomić M. M. (2012). Modeling Thermal Effects in Braking Systems of Railway Vehicles. *THERMAL SCIENCE*, 16. 581-592.
18. ORE B 106/RP 12. (1989). Standardization of coaches, Standardization of a block-braked solid wheel (tread diameter 920 mm) for coaches with a top speed of 160 km/h. Basic calculations. Utrecht.
19. Jovanović, R., Milutinović, D. (1999). Modern Ways for Preventing the Damages Caused by the Railway Vehicle Solid Wheel Fractures (in Serbian). *VI International Scientific Conference of Railway Experts – JUŽEL*.
20. Milutinović, D., Tasić, M., Jovanović, R. (1999). Thermal Load as a Primary Cause for the Fracture of the Block-Braked Solid Wheel. *Železnice*, 11-12.
21. UIC 510-2. (1998). Matériel remorqué. Roues et essieux montés. Conditions concernant l'utilisation des roues de différents diamètres. 3e édition 1.1.
22. UIC 812-3. (1984). Technical specification for the supply of solid (monoblock) wheels in rolled non-alloy steel for tractive and trailing stock. 5th edition 1.1.
23. Pavlyukov A. E., Cherepov O. V., & Shalupina P. I. (2017). Tormoznie kolodki gruzovikh vagonov: analiz povrezhdaemosti i faktorov, vliyayushchikh na sozdanie tormoznoi sili [Brake pads of freight cars: analysis of damage and factors influencing the creation of braking force]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 4 (36). 4–11.
24. Asadchenko V. R. (2006). Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic rolling stock brakes] : tutorial for high schools of railways trans. Moscow : Marshrut [in Russian].
25. *Klasyfikatsiia nespravnostei vahonnykh kolisnykh par ta yikh elementiv [Classification of malfunctions of wagon wheel pairs and their elements]* (2006) Zatverdzhena nakazom Ukrzaliznytsi № 095-Ts 15.03.2006 [Approved by the order of Ukrzaliznytsia No. 095-C on 15.03.2006], Kyiv [in Ukrainian].
26. Kolisni pary vantazhnykh vahoniv. Pravyla tekhnichnoho obsluhovuvannia, remontu ta formuvannia [Wheel pairs of freight cars. Rules of maintenance, repair and formation]. (2015). STP 04-001:2015. Kyiv [in Ukrainian].
27. Ravlyuk, V. G. (2019). Modernizatsiia elementiv halmovoi vazhilnoi peredachi vizkiv vantazhnykh vahoniv [Modernization of elements of brake lever transmission of carts of freight cars]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akad. V. Lazariana*, 5(83), 108-121 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15802/stp2019/182013>.
28. Analiz stanu bezpeky rukhu v strukturi AT «Ukrzaliznytsia» u 2019 rotsi. (2019). Aktsionerne tovarystvo «Ukrainska zaliznytsia» Departament bezpeky rukhu. Kyiv [in Ukrainian].
29. Vostrikov, Ya. A., & Zhatchenko, V. M. (2016). Investigation of cast iron for a brake pad. *II Scientific-technical and economic cooperation of the countries of the Asia-Pacific region in the XXI century*, 1. 48-51 [in English].
30. Shakin, A. V., Fadeev, V. S., & Shtanov, O. V. (2014). Wagon brake pads of increased wear resistance. *II Railway engineering*, 4. 68-71 [in English].
31. Fomin O., Lovska A., Daki O., Bohomia V., Tymoshchuk O., & Tkachenko V. (2019). Determining the dynamic loading on an open-top wagon with a two-pipe girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(99)), 18 – 25.
32. *Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy : TsT – TsV – TsL – 0015 [Operating Instructions for Rolling Stock Brakes on Railways of Ukraine: CT - CB - CL - 0015]* (2004). Zatverdzhena nakazom Ukrzaliznytsi №264-Ts 28.10.1997 [Approved by the order of Ukrzaliznytsia No. 264-II on October 28, 1997], Kiev [in Ukrainian].

**Alyona Lovska<sup>1</sup>, Vasyl Ravlyuk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

<sup>2</sup>Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

## IDENTIFICATION OF THE CAUSES OF SURFACE DEFECTS OF WHEELS OF CARS EQUIPPED WITH COMPOSITE PADS

*The paper presents the results of the analysis of surface defects and faults of freight car wheels caused by frictional interaction with composite brake pads. It is established that the main influence on*

*the thermomechanical behavior of freight car wheels is caused by thermal loads that occur during braking. In cases of thermal overloads, which arise mainly as a result of prolonged braking, the generation of stresses and deformations occurs, the consequences of which are the appearance of high-temperature local defects on the rolling surface of freight car wheels. These defects negatively affect the safety of trains and significantly increase the operating costs of railway transport.*

*To determine the thermal stress state of the freight car wheel during braking, its calculation was carried out. As a calculation method, the finite element method was used, which is implemented in the SolidWorks Simulation software package. The temperature effect on the wheel during braking is determined to be permissible from the point of view of ensuring the strength of the wheel.*

*The conducted research will contribute to the creation of recommendations for managing the temperature effect on the wheel, as well as improving the safety of trains and significantly reducing operating costs in railway transport.*

**Keywords:** *freight car, brake pad, wheel defects, wheel strength, thermal stress state.*