

О. І. Бабаченко¹, чл.-кор. НАН України, д.т.н., ORCID 0000-0003-4710-0343**Р. В. Подольський**^{1,2}, докт. філ., ORCID 0000-0002-0288-0641**Г. А. Кононенко**^{1,3,*}, д.т.н., ст. дослідник, ORCID 0000-0001-7446-4105**О. А. Сафронова**¹, н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-4032-4275**О. Л. Сафронов**¹, м.н.с., ORCID 0009-0007-1308-5380**Ж. А. Дементьєва**¹, н.с., ORCID 0009-0002-3194-9975¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України² Інститут прикладних систем управління НАН України³ НТУ «Дніпровська політехніка»* Автор для листування: perlit@ua.fm

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗМІНИ МІКРОТВЕРДОСТІ ЛИТИХ І КАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС РІЗНИХ КЛАСІВ ПІСЛЯ ЕКСТРЕНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

Результати отримані в рамках Українсько-німецького проекту «Вплив структурної та хімічної неоднорідності на зносостійкість та поширення втомних тріщин в місці контакту колеса-рейка» (номер держреєстрації 0124U003037) за договором М14-2025/КС.0227.25 від 30.04.2024.

Анотація. Актуальність. Розвиток залізничного транспорту в Україні набуває особливого стратегічного значення в умовах воєнного стану та у період післявоєнного відновлення. Одним із ключових чинників надійності та безпеки рухомого складу є стан поверхні кочення залізничних коліс, яка під час експлуатації зазнає дії складних термомеханічних навантажень. Виникнення дефектів теплового походження, таких як білий шар травлення (WEL), повзуни, термотріщини та інших істотно знижує ресурс колеса та спричиняє додаткові витрати на обслуговування і ремонт. **Мета.** Дослідження в лабораторних умовах впливу хімічного складу сталі та способу виробництва залізничного колеса на формування WEL і BEL в умовах екстремального гальмування. **Методика.** Як матеріали для дослідження обрано зразки з ободів залізничних коліс різного способу виготовлення (суцільнокатані та литі), класів С і В та марки 2 з різним вмістом вуглецю (0,61–0,76 %) і твердістю (293–333 НВ). Експерименти виконувалися на спеціальному випробувальному стенді, що моделював умови екстремного гальмування юзом при швидкості руху 100 км/год. Визначення механічних властивостей здійснювали на випробувальних машинах Instron та ПСВ-30; твердість оцінювали за Брінеллем і за мікротвердістю.

© О. І. Бабаченко, Р. В. Подольський, Г. А. Кононенко, О. А. Сафронова, О. Л. Сафронов, Ж. А. Дементьєва, 2025

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Металографічні дослідження проводили з використанням оптичних мікроскопів «Carl Zeiss» після травлення зразків ніталем. **Результати.** Встановлено, що у всіх зразках після випробувань формується зона WEL з мартенситною структурою та підвищеною твердістю (до 8000 Н/мм²). Для литих коліс характерна більша товщина WEL (4–4,3 мм), ніж для суцільнокатаних (2–3 мм), що зумовлено більш вираженою хімічною неоднорідністю та дендритною ліквіацією. Виявлено наявність перехідної зони BEL з твердістю 3000–7200 Н/мм², яка являє собою високодисперсний перліт з підвищеною витравлюваністю. Зі збільшенням вмісту вуглецю товщина WEL зростає: для сталі з 0,76 % С – близько 3 мм, тоді як для сталі з 0,61 % С – близько 2 мм. **Висновки.** Підтверджено, що хімічний склад і спосіб виготовлення колеса є визначальними факторами чутливості сталі до утворення WEL та BEL. Литі колеса демонструють більшу схильність до розвитку термічних дефектів, тоді як суцільнокатані є більш стійкими завдяки одноріднішій структурі. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації хімічного складу та технології виготовлення залізничних коліс з підвищеною стійкістю до деформаційно-теплого навантаження.

Ключові слова: хімічний склад, експлуатаційні дефекти, мікротвердість, залізничний транспорт, мікроструктура, теплове навантаження.

Посилання для цитування: Порівняльний аналіз зміни мікротвердості литих і катаних залізничних коліс різних класів після екстреного гальмування / О. І. Бабаченко, Р. В. Подольський, Г. А. Кононенко, О. А. Сафронова, О. Л. Сафронов, Ж. А. Дементьєва // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 195-209. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-11>

Актуальність. Актуальність роботи зумовлена стратегічним значенням розвитку залізничного транспорту в умовах воєнного стану та майбутнього повоєнного відновлення України. Залізничний транспорт сьогодні виконує ключові логістичні функції для забезпечення обороноздатності держави та міжнародних зобов'язань. Його переваги – висока ефективність, екологічність та безпека перевезень, однак ці характеристики значною мірою визначаються надійністю роботи системи «колесо-рейка». Одним із найбільш поширених і небезпечних дефектів є утворення повзунів та «білого шару» (WEL), які виникають під дією екстремальних теплових і механічних навантажень при гальмуванні. Ці дефекти призводять до утворення тріщин, нерівномірного зношування, додаткових ударних навантажень на колію та рухомий склад, зниження ресурсу коліс та потреби у частих переточуваннях. Дослідження механізмів їх утворення та впливу структури і властивостей сталі на стійкість до теплових дефектів є необхідною умовою підвищення надійності та довговічності залізничних коліс.

Мета дослідження. Дослідити вплив хімічного складу сталей та способу виробництва залізничних коліс (литі чи суцільнокатані) на формування зон теплового впливу (WEL, BEL та перехідних шарів) під час екстреного гальмування, визначити їхню товщину, мікроструктуру та мікротвердість, та оцінити чутливість різних класів колісних сталей до утворення дефектів теплового походження.

Стан питання. Вважається, що фазові зміни металу ободу залізничного колеса внаслідок термічного навантаження під час екстреного гальмування відіграють важливу роль у формуванні так званого білого шару травлення (WEL- англ. white etching layers), який часто пов'язаний з виникненням тріщин RCF (англ. Rolling Contact Fatigue) [1-3]. WEL являє собою твердий і крихкий матеріал, який утворюється на поверхні кочення в процесі експлуатації колеса [1].

Механізм утворення білого шару WEL на поверхні кочення залізничних коліс як експлуатаційного дефекту теплового походження залишається предметом дискусій у літературі [4, 5]. Запропоновано два можливі механізми утворення: (1) утворення мартенситу внаслідок швидкого циклу нагрівання та охолодження, спричиненого тертям від контакту колеса та рейки, (2) розчинення цементиту та подрібнення зерна, що призводить до формування перенасиченого вуглецем нанокристалічного фериту, спричиненого сильною пластичною деформацією [4, 5]. Нещодавні дослідження, проведені [4, 5], дозволили зробити висновок, що саме перший механізм відповідає за WEL через наявність мартенситу та більшої частки залишкового аустеніту, ніж у об'ємному матеріалі.

Ще один шар зі зміненою мікроструктурою, який утворюється в зоні контакту колеса з рейкою через дію високих температур від тертя, називають коричневим шаром травлення BEL (англ. brown etching layers) [5-7]. Подібно до WEL, BEL також завдячує своєю назвою кольору, який спостерігається під час металографічних досліджень після травлення ніталем [6]. Зазвичай BEL розташований під білим шаром (WEL), але може утворюватися і самостійно на поверхні BEL [7]. BEL також демонструє підвищену твердість відносно основного металу ободу колеса, яка може становити від 700 до 800 HV [5, 7]. У дослідженні [6] виміряли розподіл твердості на BEL при товщині близько 100 мкм і виявили зниження твердості до 540 HV на межі розділу між WEL та BEL, після чого твердість збільшувалася за глибиною до максимуму 740 HV. Автори роботи дійшли висновку, що BEL утворюється внаслідок перекристалізації після швидкого нагрівання та охолодження, викликаних нагріванням фрикційного контакту пари «колесо-рейка». Зниження твердості на межі WEL/BEL

пояснюється результатом пов'язане з відпуском утвореного мартенситу під дією повторних циклів нагріву. Автори роботи [5] представляють дві теорії утворення BEL: (1) утворення відбувається, коли максимальна температура нагріву залишається нижче критичної температури A_1 ; (2) утворення відбувається через сильну пластичну деформацію, яка призводить до часткового розчинення цементитних рейок.

Наступні цикли нагрівання трохи вище температури A_1 створюють умови для формування аустеніту, який при охолодженні перетворюється на мартенсит або зберігається у вигляді аустеніту. Це призводить до формування мікроструктури, що містить пересичений ферит, частково розчинений цементит та острівці мартенситу/залишкового аустеніту. Інший механізм утворення реалізується, коли максимальна температура перевищує температуру A_1 з самого початку. Це призводить до утворення більшої кількості аустеніту. При охолодженні аустеніт також перетворюється на мартенсит. В результаті дії наступних циклів нагрівання проходить відпуск мартенситу, що призводить до виділення карбідів.

Виділяють три види дефектів коліс типу вищербин, виникнення яких пов'язано умовами експлуатації: повзуни, навари – викришування твердих ділянок поверхні кочення, що утворилися в результаті високотемпературного нагріву при короткочасному ковзанні колісних пар, що заклинили, по рейках; втомні тріщини – втомне руйнування поверхневих шарів під дією контактних напружень, що багаторазово повторюються; по сітці термотріщин – викришування ділянок поверхні кочення, на яких є поперечні термотріщини, що виникли внаслідок її циклічного нагрівання гальмівними колодками. З перерахованих типів вищербин найбільш поширеними, як свідчать літературні дані [8, 9], є дефекти, які утворилися в результаті теплового впливу на поверхню кочення колеса.

В даній роботі проведено порівняльні дослідження металу коліс марки 2 (суцільнокатане), класу В (лите) та класу С різного способу виробництва (суцільнокатане та лите) на чутливість до утворення дефектів теплового впливу після гальмування в складних умовах, які можуть виникати в процесі експлуатації.

Відомо, що на утворення вищербин впливає цілий ряд факторів експлуатаційного і матеріалознавчого характеру. До перших відносяться інтенсивність гальмування, швидкість руху вагона, стан гальмівної системи та ін. Матеріалознавчими факторами в першу чергу є хімічний склад колісної сталі і структурний стан колеса, який визначається технологією його виготовлення. Багатьма авторами було показано, що умови експлуатації чинять визначальний вплив на процес утворення вищербин [8-10]. Однак перераховані вище матеріалознавчі

чинники також можуть чинити певний вплив на чутливість сталей до утворення дефектів теплового походження.

Матеріал та методика досліджень.

Для проведення досліджень як матеріал було обрано зразки з ободів залізничних коліс різного способу виготовлення (суцільнокатані та литі) з різним вмістом вуглецю (0,61-0,76 %, мас.) та рівнем твердості (293-333 НВ). Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних коліс наведено в табл. 1 та 2. Механічні властивості оцінювали на циліндричних зразках з робочим діаметром 5 мм. Токарний верстат HAAS ST10 використовувався для обробки зразків до необхідних розмірів для випробувань. Випробування на розтяг проводили за допомогою машини Instron. Для визначення ударної в'язкості використовували маятниковий копер ПСВ-30.

Таблиця 1 - Хімічний склад сталі досліджуваних залізничних коліс, мас. %*100.

Марка, клас	Спосіб виробництва	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
C	Лите	72	46	76	1,3	2,1	11	4,0	8,0	0,7
C	Катане	76	28	76	0,8	1,3	-	10	14	-
B	Лите	63	45	69	1,3	1,4	-	9,6	10	3,1
2	Катане	61	35	74	0,5	0,7	8	4,0	9,0	0,5

Таблиця 2 - Механічні властивості сталі досліджуваних залізничних коліс.

Марка, клас	Спосіб виробництва	σ_{UTS} , МПа	σ_{YS} , МПа	δ , %	ψ , %	Сер. твердість на гл. 30мм, НВ	Сер. КСЧ, Дж/см ²
C	Лите	1206,3	806,5	9,2	14,4	328	8,5
C	Катане	1167,0	790,0	12,0	31,0	332,5	23,7
B	Лите	1026,3	604,5	10,0	16,6	293	25,5
2	Катане	975	614,6	14,4	45,0	296,3	42,0

Твердість дослідних сталей вимірювали за ДСТУ ISO 6506-1:2007 «Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування» кулькою діаметром 10 мм при зусиллі 29430 Н (3000 кгс). Мікротвердість структурної складової визначали на мікротвердомірі LHVZ-1000 з навантаженням 50 г.

Металографічні дослідження виконувались на світловому мікроскопі виробництва компанії «Carl Zeiss» моделей «Neophot 32» і «Axiovert 200 M MAT». Металографічні шліфи виготовляли

механічним способом на обладнанні компанії Struers моделі LaboPol-5. Аналіз мікроструктури проводили у світлому полі. Для виявлення мікроструктури застосовувались реактив ніталь.

Для проведення порівняльних досліджень впливу вмісту вуглецю та способу виготовлення колеса на чутливість сталі до утворення дефектів теплового впливу необхідно, щоб вплив інших факторів (в тому числі і експлуатаційних) був незмінним. У реальних умовах експлуатації коліс це зробити неможливо. Тому такі дослідження проводилися в лабораторних умовах.

Для проведення досліджень використовували спеціальний випробувальний стенд і методику (рис. 1), розроблену Інститутом чорної металургії НАН України, що передбачає моделювання умов екстреного гальмування залізничних коліс в процесі експлуатації - руху колеса юзом.



Рисунок 1 – Загальний вигляд випробувального стенду «485 Рч» для моделювання екстреного гальмування в парі «колесо-рейка» та зразка.

Випробування на стенді (рис. 1) реалізовані в такий спосіб:

- тілом обертання є колесо діаметром 1 метр з поверхнею кочення, яка виготовлена за профілем головки рейки з рейкової сталі;
- лінійна швидкість на поверхні колеса - 27,8 м/сек (100 км/год.);
- в ході обертання до поверхні колеса за допомогою гідравліки притискається дослідний зразок розмірами 100 × 60 × 30 мм, закріплений в масивне оправлення з обода колеса;
- час дії прикладеного зусилля, яке може змінюватися від 0 до 1000 кгс, вибирається в залежності від температури, яку необхідно досягти в зразку в ході гальмування, після цього контакт зразка з колесом миттєво переривається.

Результатом вищенаведеної взаємодії є моделювання умов гальмування колеса в ході експлуатації. У зоні контакту по глибині від поверхні кочення формується зона теплового впливу, складовою якої є «білий шар» (WEL) з мартенситною структурою і, як наслідок, з високою мікротвердістю.

Результати розрахунків теплових полів, що виникають при екстремому гальмуванні [11, 12], показали, що максимальні значення температури в зоні контакту при експлуатації колеса можуть досягати 1000 °С. При цьому, спостерігається виникнення істотних напружень розтягу, що перевищують в 1,3-1,5 рази границю плинності матеріалу [11].

Контрольованими параметрами досліджень, що визначають чутливість сталі до теплового впливу, є глибина «білого шару», його мікроструктура і мікротвердість по перетину.

Дослідним шляхом були встановлені оптимальні параметри навантаження, які забезпечують розігрів зразків з колісних сталей в місці контакту до температури 800-850°С. Подальше прискорене охолодження дослідного зразка за рахунок відведення тепла в його масив призводить до утворення в ньому структур гарту на глибину, близьку до глибини WEL, одержуваних в процесі експлуатації залізничного колеса. При цьому швидкість охолодження в критичному інтервалі температур, як показують розрахунки, складає 350...400 °С/с, що вище критичної швидкості гарту для колісних сталей.

Результати. На рис. 2 представлені графіки зміни мікротвердості по перетину зразків, вирізаних з обода литого колеса класу С та В і суцільнокатаних коліс зі сталі марок 2 і класу С. Результати вимірювань мікротвердості, а також металографічні дослідження, свідчать про те, що в поверхневих шарах досліджуваних зразків утворилася слабо витравлювана область з підвищеною мікротвердістю і структурою високовуглецевого мартенситу (WEL), аналогічна тій, яка спостерігається в поверхневих шарах залізничних коліс з дефектами типу «вищербини». Як впливає із залежності, представлені на рис. 2, збільшення вмісту вуглецю в сталі для залізничних коліс (табл. 1) призводить до підвищення її чутливості до термічного впливу. Це пов'язано зі зниженням температури критичної точки АС₃ і підвищенням стійкості аустеніту при зміні хімічного складу досліджуваної сталі. Так на зразках з обода суцільнокатаного колеса класу С (0,76 % С) глибина білого шару склала близько 3 мм, в той час як для сталі марки 2 (0,61 %С) вона становить 2 мм відповідно (рис. 2). Для литих коліс класу С (0,72%С) та В (0,63 %С) значення даної характеристики склало 4,3 мм та 4 мм відповідно. Не зважаючи на близький хімічний склад литого і суцільнокатаного коліс одного класу С (0,72 і 0,76 % С відповідно) та близькими за хімічним складом В та 2 значно більша товщина WEL для зразків зі сталі від литого колеса ймовірно пов'язана з вираженою хімічною неоднорідністю металу (скупченнями хімічних елементів), яка сприяє зсуву критичних

температур перетворення.

Що стосується мікротвердості поверхневих шарів, то її величина для досліджуваних сталей з різним вмістом вуглецю приблизно однакова і становить 8000 Н/мм².

Встановлено, що з підвищенням вмісту вуглецю в сталі, товщина WEL збільшується, отже, при нагріванні колеса в експлуатації в умовах гальмування юзом, за інших рівних умов сталі з більшим вмістом вуглецю матимуть WEL зі структурою мартенситу більшої товщини.

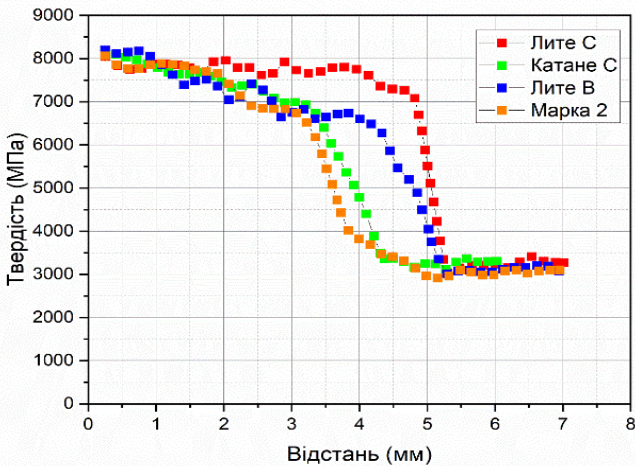


Рисунок 2 – Зміна мікротвердості по перерізу зразків з досліджуваних залізничних коліс (литого класу С, катаного класу С, литого класу В, та катаного марки 2) після екстреного гальмування.

Було виконано аналіз мікроструктури по перетину зразків з досліджуваних колісних сталей (рис. 3-6). Утворений WEL являє собою високовуглецевий дрібногочастий мартенсит (рис. 3-5, а, б; рис. 6, а). У тонкому поверхневому шарі спостерігається значна пластична деформація. При переході від основного металу до WEL спостерігається підвищення витравлюваності перлітних колоній - BEL (рис. 3-5, в-д; рис. 6, б-в).

З віддаленням від контактної поверхні кількість мартенситу зменшується, а кількість надлишкового фериту збільшується. Структура основного металу являє собою перліт зі структурно вільним феритом (рис. 3-5, ж; рис. 6, г).

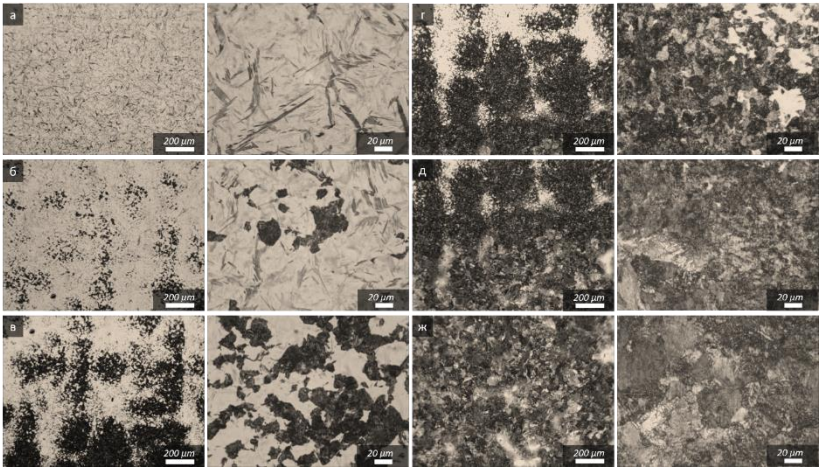


Рисунок 3 – Мікроструктура «білого шару» на зразках зі сталі литих коліс класу С: а-б - «білий шар»; в-д - перехідна зона; ж - основний метал.

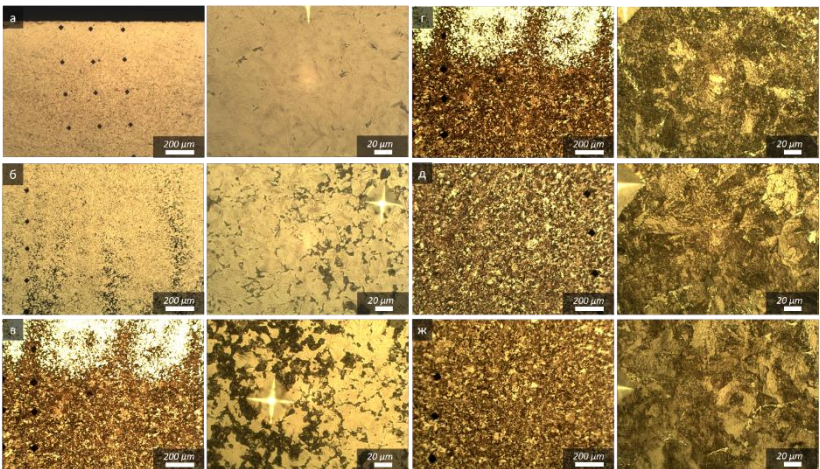


Рисунок 4 – Мікроструктура «білого шару» на зразках з литого колеса класу В: а-б - «білий шар»; в-д - перехідна зона; ж - основний метал.

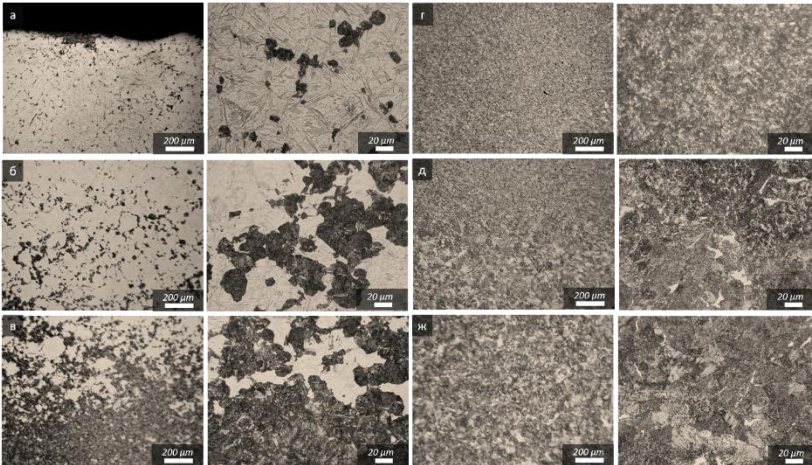


Рисунок 5 – Мікроструктура зразків, вирізаних з ободів коліс марки «2»: а-б - «білий шар»; в-д - перехідна зона; е - основний метал.

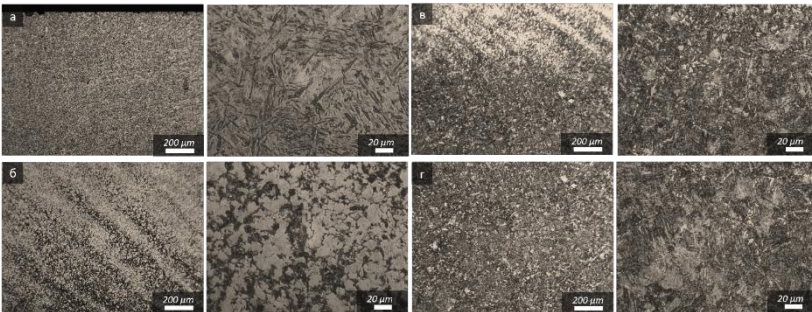


Рисунок 6 – Мікроструктура зразків, вирізаних з суцільнокатаних коліс класу С: а - «білий шар»; б-в - перехідна зона; г - основний метал.

В результаті проведених досліджень мікроструктури було встановлено, що при екстремальному гальмуванні залізничного колеса відбувається формування WEL, BEL та перехідна зона між ними. В залежності від хімічного складу сталей та способу виробництва залізничних коліс з них змінюється товщина цих зон та співвідношення між ними. Було виконано співставний аналіз визначених металографічно значень товщин цих зон та розподілу мікротвердості залежно від відстані до поверхні контакту при випробуваннях. На рис. 7 показано залежність зміни мікротвердості по перерізу з вказаними областями формування WEL, BEL, перехідної зони PD.

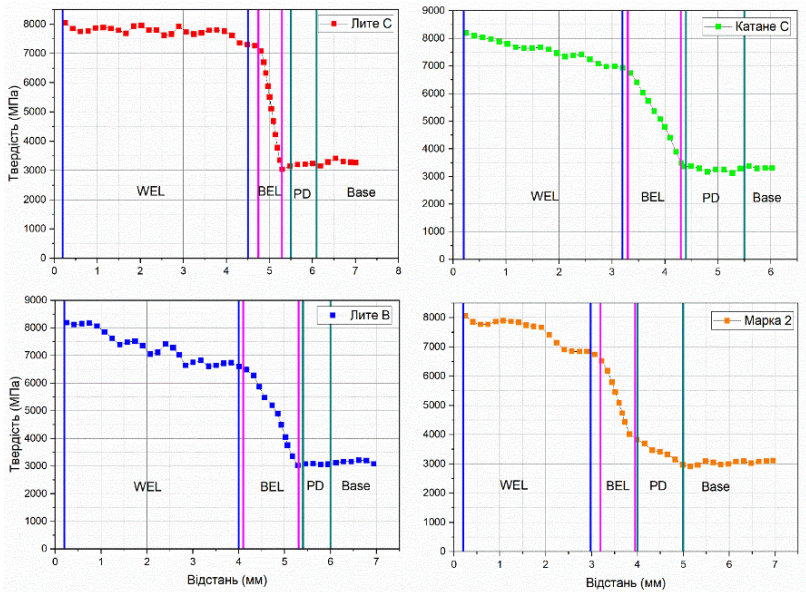


Рисунок 7 – Залежність зміни мікротвердості по перерізу з визначеними областями формування «білого» шару (WEL), «коричневого» шару (BEL), перехідної зони (PD), основної матриці (Base).

В результаті проведеного випробування, що являє собою по суті термомеханічне навантаження з наближеними умовами до екстреного гальмування залізничних коліс юзом по залізничній рейці, встановлено відмінність між колесами різних способів виробництва. Показано, що в сталі коліс, виготовлених ливарним способом виробництва, область «білого» шару (WEL) значно більша порівняно зі сталями суцільнокатаних коліс. Це вказує на вплив структури, що зберігається після ливарного процесу, а саме хімічну неоднорідність, чітко сформовану дендритну ліквіацію, наявність витіснених неметалевих включень по фронту стовпчастого зерна дендритів. Формування проміжної області «коричневого» шару (BEL) має зміщений фронт в зразках з литих коліс, що пояснюється більшою товщиною «білого» шару (WEL). Для литих коліс BEL формується в області 4,75...5,5 мм від поверхні, в той час як для суцільнокатаних - 3,2...4,3 мм.

Слід зазначити, що область перехідної зони по товщині зразків із залізничних коліс, виготовлених ливарним способом виробництва (С та В), має меншу протяжність порівняно зі зразками з суцільнокатаних залізничних коліс (С та 2), а саме ~0,7 мм для литих та ~1,1 мм для суцільнокатаних. Це вказує на значний спротив основної структури до

зміни будови під дією термомеханічного впливу з високим ступенем локального перегріву та точкового навантаження.

Дослідження, результати яких викладено в статті, фінансувалося Міністерством освіти і науки України в рамках програми «Спільний українсько-німецький науково-дослідний проект, що виконується в рамках Українсько-німецького науково-технічного співробітництва» роботи «Вплив структурної та хімічної неоднорідності на зносостійкість та поширення втомних тріщин в місці контакту колеса - рейка» (номер держреєстрації 0124U003037) за договором № М/14 -2024 від 30.04.2024 р.

Висновки

1. Встановлено, що товщина білого шару (WEL) суттєво залежить від вмісту вуглецю та способу виробництва коліс: для суцільнокатаних сталей марки 2 (0,61 % C) вона становить близько 2 мм, тоді як для литих коліс класу С (0,72 % C) сягає 4,3 мм. Показано, що литі залізничні колеса мають значно більшу глибину WEL, що зумовлено структурною та хімічною неоднорідністю металу.

2. Мікротвердість поверхневих шарів у всіх досліджуваних коліс становить близько 8000 Н/мм², що підтверджує утворення мартенситної структури у WEL та підвищену чутливість сталі до термічного впливу при екстремому гальмуванні.

3. Виявлено, що поряд із WEL формується перехідна зона та коричневий шар (BEL), товщина та характеристики яких відрізняються залежно від складу і технології виготовлення сталі, що визначає стійкість коліс до термічних дефектів та їх експлуатаційний ресурс.

Перелік посилань

1. Vo K.D., Tieu A.K., Zhu H.T., Kosasih P. B. A tool to estimate the wheel/rail contact and temperature rising under dry, wet, oil conditions. *Conference: The 14th International Conference on Railway Engineering Design and Optimisation*. 2014. Vol. 135. P. 191 – 201. <https://doi.org/10.2495/CR140151>

2. Ertz M., Knothe K. A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel/rail contact. *Wear*. 2002. Vol. 253. P.498–508. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00120-5).

3. Naeimi M., Li S., Li Z., Wu J., Petrov R.H., Sietsma J., Dollevoet R. Thermomechanical analysis of the wheel-rail contact using a coupled modelling procedure. *Tribology International*. 2018. Vol. 117. P. 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.09.010>.

4. Wu J. Microstructure evolution in pearlitic rail steel due to rail/wheel interaction. Dissertation (TUDelft), *Delft University of Technology*. 2018. 143 p. <https://doi.org/10.4233/uuid:c536ca47-8981-4a9e-916f396bcba4bc5>

5. Kumar A., Saxena A.K., Kirchlechner C., Herbig M., Brinkmann S., Petrov R.H., Sietsma J. In situ study on fracture behaviour of white etching layers formed on rails. *Acta Materialia*. 2019. Vol.180. P. 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.08.060>.

6. Li S., Petrov R., Wu J., Li Z., Dollevoet R., Sietsma J. "Brown etching layer": A possible new insight into the crack initiation of rolling contact fatigue in rail steels? *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol.66. P. 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.019>.
7. Messaadi M., Steenberg M. Stratified surface layers on rails. *Wear*. 2018. Vol. 414-415. P. 151–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.019>.
8. Ларин Т.В., Девяткин В.П. О механизме износа железнодорожных колес. *Трение и износ в машинах*. 1956. №11. С. 33-35.
9. Контактно-усталостное повреждение колес грузовых вагонов. *Труды ВНИИЖТ*. Под ред. д.т.н., проф. С.М. Захарова. М.: Интекст. 2004. 160с.
10. Дружинін М.О., Сухомлин В.І., Нестеренко А.М., Книш А.В. Особливості структури білих шарів на поверхні катання залізничних коліс. *Металознавство та обробка металів*. 2008. №2. С.3-7.
11. Чичин А.В. Тенденции развития колес нового поколения. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2007. № 3. С. 22-24.
12. Асташкевич Б.М., Иванов С.Г., Воронин И.Н. и др. Исследование эксплуатационных дефектов фрикционного сопряжения тормозной колодки с колесом вагона. *Вестник ВНИИЖТ*. 2004. № 4. С. 31-38.

References

1. Vo, K. D., Tieu, A. K., Zhu, H. T. & Kosasih, P. B. (2014) A tool to estimate the wheel/rail contact and temperature rising under dry, wet, oil conditions. Conference: *The 14th International Conference on Railway Engineering Design and Optimisation*, 135, 191 – 201. <https://doi.org/10.2495/CR140151>
2. Ertz, M. & Knothe, K. (2022) A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel/rail contact. *Wear*, 253, 498–508. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00120-5).
3. Naeimi, M., Li, S., Li, Z., Wu, J., Petrov, R.H., Sietsma, J. & Dollevoet, R. (2018) Thermomechanical analysis of the wheel-rail contact using a coupled modelling procedure. *Tribology International*, 117, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.09.010>.
4. Wu, J. (2018) Microstructure evolution in pearlitic rail steel due to rail/wheel interaction. Dissertation (TUDelft), Delft University of Technology, 143 p. <https://doi.org/10.4233/uuid:c536ca47-8981-4a9e-916f396bcba4bc5>
5. Kumar, A., Saxena, A.K., Kirchlechner, C., Herbig, M., Brinkmann, S., Petrov, R. H. & Sietsma, J. (2019) In situ study on fracture behaviour of white etching layers formed on rails. *Acta Materialia*, 180, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.08.060>.
6. Li, S., Petrov, R., Wu, J., Li, Z., Dollevoet, R. & Sietsma, J. (2016) "Brown etching layer": A possible new insight into the crack initiation of rolling contact fatigue in rail steels? *Engineering Failure Analysis*, 66, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.019>.
7. Messaadi, M. & Steenberg, M. (2018) Stratified surface layers on rails. *Wear*, 414-415, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.019>.
8. Larin, T. V. & Devyatki, V. P. (1956) О механизме износа железнодорожных колес. *Трение и износ в машинах* [On the mechanism of wear of railway wheels] *Friction and wear in machines*, 11, 33-35.

9. Kontaktno-ustalostnoe povrezhdenie koles gruzovyih vagonov (2004) [Contact fatigue damage to freight car wheels]. *Proceedings of VNIIZHT*. Intekst.
10. Druzhynin, M. O., Sukhomlyn, V. I., Nesterenko, A. M. & Knysh, A. V. (2008) Osoblyvosti struktury bilykh shariv na poverkhni katannia zaliznychnykh kolis [Features of the structure of white balls on the surface of the rolling wheels] *Metal science and processing of metals*, 2, 3-7.
11. Chichin, A. V. (2007) Tendentsii rozvitiya koles novogo pokoleniya. Vagonyi i vagonnoe hozyaystvo [Trends in the Development of Next-Generation Wheels] *Carriages and Carriage Facilities*, 3, 22-24.
12. Astashkevich, B. M., Ivanov, S. G. & Voronin, I. N., et al (2004) Issledovanie ekspluatatsionnykh defektov friktsionnogo sopryazheniya tormoznoy kolodki s kolesom vagona [Study of operational defects of the frictional coupling of a brake shoe with a wagon wheel]. *Proceedings of VNIIZHT*, 4, 31-38.

O. I. Babachenko¹, D. Sc. (Tech.), Cor.-Mem. NAS of Ukraine, ORCID 0000-0003-4710-0343

R. V. Podolskyi^{1,2}, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641

G. A. Kononenko^{1,3,*}, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

O. A. Safronova¹, PhD -student, Researcher, ORCID 0000-0002-4032-4275

O. L. Safronov¹, Junior Researcher, ORCID 0009-0007-1308-5380

Zh. A. Dementeva¹, Researcher, ORCID 0009-0002-3194-9975

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

² *Institute of Applied Control Systems National Academy of Sciences of Ukraine*

³ *Dnipro University of Technology*

* *Corresponding author: perlit@ua.fm*

COMPARATIVE ANALYSIS OF CHANGES IN MICROHARDNESS OF CAST AND ROLLED RAILWAY WHEELS OF DIFFERENT CLASSES AFTER EMERGENCY BRAKING

Abstract. Actuality. The development of railway transport in Ukraine acquires special strategic importance in conditions of martial law and in the period of post-war reconstruction. One of the key factors of reliability and safety of rolling stock is the condition of the rolling surface of railway wheels, which during operation is subjected to complex thermomechanical loads. The occurrence of defects of thermal origin, such as white etching layer (WEL), sliders, thermal cracks and others, significantly reduces the resource of the wheel and causes additional costs for maintenance and repair.

Purpose. Laboratory study of the influence of the chemical composition of steel and the method of production of railway wheels on the formation of WEL and BEL under conditions of extreme braking. **Methodology.** As materials for the study, samples from the rims of railway wheels of different manufacturing methods (solid-rolled and cast), classes C and B and grade 2 with different carbon content (0.61-0.76%) and hardness (293-333 HB) were selected. The experiments were performed on a special test stand that simulated the conditions of emergency braking by a wheel at a speed of 100 km/h.

The determination of mechanical properties was carried out on Instron and PSV-30 testing machines; hardness was estimated by Brinell and microhardness. Metallographic studies were carried out using Carl Zeiss optical microscopes after etching the samples with nital. **Results.** It was established that in all samples after the tests a WEL zone with a martensitic structure and increased hardness (up to 8000 N/mm²) is formed. Cast wheels are characterized by a greater thickness of WEL (4–4.3 mm) than solid-rolled wheels (2–3 mm), which is due to more pronounced chemical heterogeneity and dendritic liquation. The presence of a BEL transition zone with a hardness of 3000–7200 N/mm² was revealed, which is a highly dispersed pearlite with increased etching ability. With increasing carbon content, the WEL thickness increases: for steel with 0.76% C - about 3 mm, while for steel with 0.61% C - about 2 mm. **Conclusions.** It was confirmed that the chemical composition and the method of manufacturing the wheel are determining factors of the sensitivity of steel to the formation of WEL and BEL. Cast wheels demonstrate a greater tendency to the development of thermal defects, while solid-rolled wheels are more stable due to a more homogeneous structure. The results obtained can be used to optimize the chemical composition and manufacturing technology of railway wheels with increased resistance to deformation and thermal loading.

Key words: chemical composition, operational defects, microhardness, railway transport, microstructure, thermal load.

For citation: Babachenko, O. I., Podolsky, R. V., Kononenko, G. A., Safronova, O. A., Safronov, O. L., & Dementieva, Zh. A. (2025). Comparative analysis of changes in microhardness of cast and rolled railway wheels of different classes after emergency braking. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 195-209. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-11>

Рукопис надійшов до редакції / Received 04.08.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025