

УДК 621.771.294:620.19:005

**І.Г.Узлов, К.І.Узлов, А.В.Книш, А.М.Хулін, Ж.А.Дементьєва,
С.В.Мямлін*, В.К.Брусякін*, Л.А.Мурадян***

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИЧИН УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА
ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ТА ПІДВИЩЕНОЇ ТВЕРДОСТІ
МІКРОЛЕГОВАНИХ СУЦЬЛНОКАТАНИХ КОЛІС**

Інститут чорної металургії НАН України

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту*

В роботі встановлено причини утворення в експлуатації дефектів на поверхні кочення вуглецевих та мікролегованих суцільнокатаних коліс. Проведений аналіз характеру зародження і розвитку тріщин у випадках КП2 та КПТ свідчить про те, що розвиток тріщини і, як наслідок, руйнування не відбувається по «білому шару» з мартенситною структурою. Ця структурна складова є ініціатором зародження тріщини. Принциповий вплив на формування вищербин мають зони термічного впливу взагалі.

дефекти на поверхні кочення залізничних коліс, хімічний склад сталі, білий шар, тріщина, мікротвердість, зона термічного впливу

Сучасний стан питання і постановка задачі. Україна має одну з найбільш розвинених у Європі мережу залізниць, експлуатаційна довжина якої складає понад 22 тис. км. За густотою вона займає провідне місце серед країн СНД і наближається за цим показником до Європейських країн: Франції та Італії. За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись лише залізницям Китаю, Росії та Індії. Вантажонапруженість українських залізниць (річний обсяг перевезень на 1км), у 3–5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн. Тобто, залізниці є базовою галуззю економіки України. На них припадає 88% вантажообігу та 50% пасажирообігу на відміну від країн ЄС, де частка залізниць становить біля 8%.

Позитивні зрушення в економіці України, постійна робота щодо залучення міжнародних транзитних перевезень забезпечили стійке зростання обсягів перевезень. Однак, ситуація ускладнюється тим, що знос рухомого складу, термін експлуатації якого складає 25–30 років, досягає 70%. Це призводить до збільшення витрат на його ремонт та на забезпечення безпеки руху, проти нормативних, більш ніж у 2 рази. Технологічні методи підвищення ресурсу залізничних коліс мають відповідати встановленим вимогам: при реалізації призначених технічних заходів середній ресурс до виключення з експлуатації має повністю бути використаним; нормування при використанні має забезпечувати ресурс 0,90–0,95 [1].

Результати дослідження. Підвищення строку служби колісних пар рухомого і тягового складу залізниць є найголовнішою проблемою. До найбільш ефективних методів підвищення довговічності коліс слід віднести зміцнення гребеню та поверхні кочення гартуванням, яке забезпечує рівномірність механічних характеристик за перетином обода колеса. Власний досвід авторів цієї роботи свідчить про те, що мікролегування колісної сталі ванадієм [2] з оптимізацією параметрів термозміцнення обумовлює досягнення сполучення високих значень твердості і ударної в'язкості і, як наслідок, впевнене підвищення експлуатаційної зносостійкості більш за 30% [2].

Сукупний масив інспекційних характеристик дефектів коліс на поверхні кочення за період 2009 – липень 2010 рр. був проаналізований за вибірковими даними лабораторії хімічного контролю ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ». На рис.1 наведено розподілення промислових коліс КП2 (коліс поточного виробництва) та КПП (високоміцних коліс) за вмістом вуглецю в експлуатації, які підлягали аналізу в наявній роботі. Статистичний аналіз всієї вибірки проаналізованих коліс КПП та КП2 об'ємом понад 600 даних (мал.1) наявно продемонстрував той факт, що абсолютна їх кількість за вмістом вуглецю відповідає значенням:

- 0,58...0,59% С для коліс КП2;
- 0,65...0,66% С для коліс КПП.

Таке концентраційне розподілення цілком адекватно задовольняє наявні вимоги щодо середніх значень вмісту вуглецю за діючими нормативними документами на відповідні вироби – ДСТУ ГОСТ 10791:2006 та ТУ У 35.2–23365425–600:2006. При цьому, встановлено, що для коліс зі сталі КП2, незважаючи на їх переважну більшість за вмістом вуглецю 0,58...0,59%, переважна більшість «повзунів тільки» спостерігається саме у виробах з вуглецем на нормативно дозволений нижній межі $\sim 0,57...0,58\%$ С (рис.2).

Попередніми дослідженнями авторів [3] було показано, що колеса підвищеної міцності та твердості КПП, за даними приймально–здавальних випробувань ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», демонструють переважні показники, водночас, твердості і міцності (рис.3). Пов'язане це явище не тільки і, навіть, не стільки з простим підвищенням вмісту вуглецю, а із зміною структурного стану колісних сталей від доєвтектоїдного феритоперлітного до квазієвтектоїдного перлітного (КП2) і до бейнітного з феритною складовою голчастої морфології (КПП). Малюнок 4 однозначно свідчить про переважну схильність коліс КП2 до формування повзунів браковочного рівня >1 мм, що очевидно пов'язано з нижчими міцностними їх характеристиками у порівнянні з КПП (рис.3).

Що стосується вищербин, то сучасні фахівці [4–7] пов'язують схильність колісно–бандажних сталей до їх з'явлення з формуванням і розмірами «білих шарів» на поверхні виробів. Тобто із формуванням під впливом тертя в процесі навантаження (термічного імпульсу)

мартенситних структур в приповерхневій контактній з рейкою зони колеса. Таке положення було б справедливим, якщо б розміщення зародкової і магістральної тріщин завжди локалізувалося в зоні «білого шару».

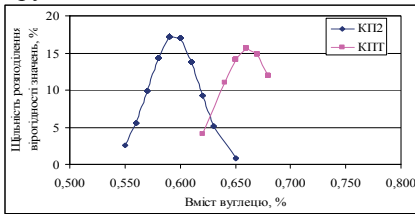


Рис. 1. Розподілення промислових коліс КП2 та КПТ в експлуатації за вмістом вуглецю.

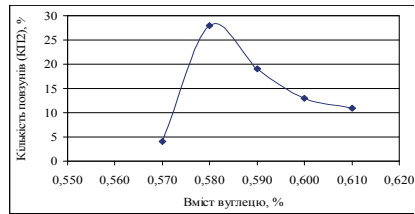


Рис. 2. Залежність кількості повзунів на поверхні кочення виробів в експлуатації від вмісту вуглецю в колісній сталі КП2.

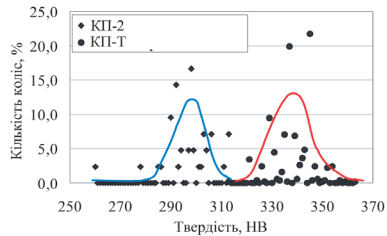
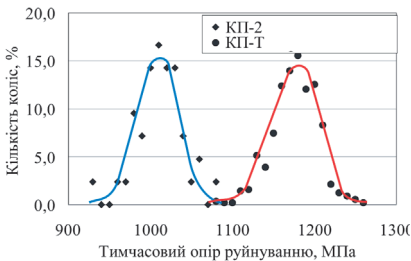


Рис. 3. Порівняльні характеристики здавальних властивостей тимчасового опору руйнуванню та твердості суцільнокатаних коліс КП2 та КПТ.

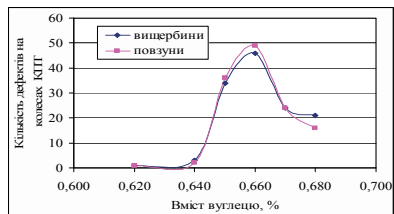
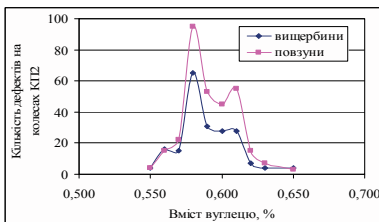


Рис. 4. Залежність кількості дефектів на колесах КП2 та КПТ від вмісту у виробі вуглецю.

Проведені дослідження зони «білого шару» і «металу основи» показали (табл.1), що градієнт твердості між поверхневою зоною гартування і тілом колеса у сталей КП 2 в 3 рази більший за відповідну сталь КП Т (115,9% проти 34,5%, відповідно). Тобто, очевидно є більша схильність «білого шару» сталі КП 2 до утворення зародків тріщин. Металографічний аналіз будови поверхонь кочення коліс КП2 та КПТ в ділянках формування дефекту очевидно продемонстрував якісно

ідентичний набір структурних зон: мартенсит; мартенсит+бейніт; дрібнодисперсний темного травлення квазіевтектоїд; вихідна структура.

Таблиця 1. Кількісні характеристики мікротвердостей «білого шару» та металу основи сталей КП2 та КПТ

Марка сталі	Мікротвердість, Н/мм ²		Різниця, Н/мм ²	Відносна різниця, %
	Білий шар	Метал основи		
КП2	7000 – 8000	3300 – 3600	4000	115,9
КПТ	5500 – 5800	4100 – 4300	1450	34,5

Найвним виявився факт (рис.5) в два рази більшої товщини мартенситного шару сталі КПТ у порівнянні із КП2 (в сталі КПТ зафіксований як 2,32 мм проти 1,02 мм для КП2). Але, при цьому сумарна товщина зони термічного впливу зафіксована більшою у сталі КП2 в порівнянні з КПТ (3,66 мм проти 3,30 мм, відповідно – рис.5). Тобто і за цим показником, при очевидному руйнуванні з формуванням вищербини не за зоною «білого шару», а в більш глибоких рівнях термічного впливу, високою є вірогідність підвищеної схильності сталі КП2 до формування вищербин, в цілому. Аналіз характеру зародження і розвитку тріщин в обох випадках КП2 та КПТ (рис.6) підтверджує той факт, що розвиток тріщини і, як наслідок, руйнування не відбувається за «білим шаром» з мартенситною структурою. Ця структурна складова є ініціатором зародження тріщини (рис.6,а). Під «білим шаром» тріщина розгалужується, розбігається в різні боки (рис.6,б). Під поверхнею в безмартенситній зоні темного травлення поодинокі тріщини зливаються (рис.6,а–в). При зустрічі із тріщиною наступного циклу попередня «сходить» на неї і вироджується (рис.6,б).

Наступні цикли навантаження при обертанні колеса руйнують дефектну структуру і на цьому місці формується кратер вищербини (рис.6,в). Дрібні тріщини, як продукт розгалуження, якщо вони не вийшли на поверхню вироджуються саме в зоні вихідної структури колісної сталі.



Рис.5. Порівняльний аналіз структурних складових сталей КП2 та КПТ в зоні термічного впливу.

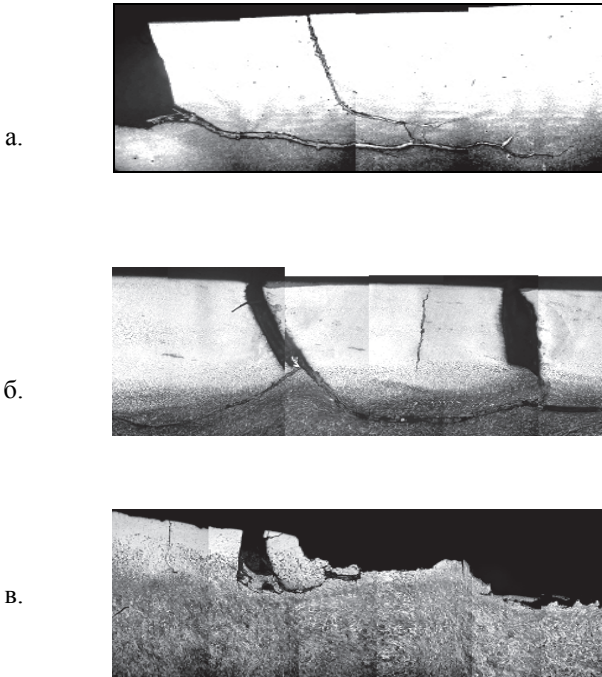


Рис.6. Зародження тріщини в «білому шарі» та її розвиток в зоні термічного впливу колеса КП Т (а); траєкторія розвитку магістральної тріщини в зоні термічного впливу колеса КП2 під «білим шаром» з її виродженням на поверхні кочення (б); відшарування мартенситної зони поверхні кочення з формуванням вищербини на поверхні колеса КП2 (в).

Аналіз даних дослідження дефектів на поверхні кочення коліс в експлуатації за період 2009–2011рр. дозволив виявити загальні закономірності (табл. 2–4).

Таблиця 2. Результати статистичного аналізу коліс за даними серпень–вересень 2009 р.

Найменування	КПТ		КП2	
	кількість	%	кількість	%
Тільки повзуни	13	4,17	251	37,57
Тільки вищербини	36	11,54	83	12,43
Повзуни + вищербинами	249	79,81	253	37,87
Без повзунів, без вищербин	14	4,49	81	12,13
Разом коліс	312	100,00	668	100,00
Колісних пар разом	156		334	
Колісних пар без дефектів	4	2,56	5	1,50

Таблиця 3. Результати статистичного аналізу коліс за даними серпень–вересень 2010 р.

Найменування	КПТ		КП2	
	кількість	%	кількість	%
Тільки повзуни	50	10,87	138	37,30
Тільки вищербини	64	13,91	75	20,27
Повзуни + вищербинами	340	73,91	142	38,38
Без повзунів, без вищербин	6	1,30	15	4,05
Разом коліс	460	100,00	370	100,00
Колісних пар разом	230		185	
Колісних пар без дефектів	3	1,31	4	2,16

Таблиця 4. Стан коліс серпень 2010 р. – січень 2011 р.

Найменування	КПТ		КП2	
	кількість	%	кількість	%
Тільки повзуни	93	11,57	498	39,65
Тільки вищербини	85	10,57	195	15,53
Повзуни + вищербинами	614	76,37	498	39,65
Без повзунів, без вищербин	12	1,49	65	5,18
Разом коліс	804	100,00	1256	100,00
Колісних пар разом	402		628	
Колісних пар без дефектів	5	1,24	16	1,27

Аналіз за позицією «Колісні пари без дефектів» встановив їх практично однакову кількість. Так, за періоди аналізів: серпень–вересень 2009 року ці показники склали величини 2,56% КПТ проти 1,50% КП2; серпень–вересень 2010 року – 1,31% КПТ проти 2,16% КП2, а обробка значного масиву даних за станом на січень 2011 року продемонструвала їх збіг – 1,24% КПТ проти 1,27% КП2. Тобто, взагалі, дані роботи свідчать про ідентичну схильність коліс КПТ та КП2 до формування тих чи інших дефектів, в залежності від марки сталі. На підтвердження факту про переважну схильність коліс КП2 до формування повзунів, пов'язану з нижчими міцностними їх характеристиками у порівнянні з КПТ, аналіз за позицією «Тільки повзуни» стабільно демонструє у всіх випадках перевищення саме цієї характеристики у КП2 проти КПТ на ~30%: серпень–вересень 2009 року ці показники склали величини 4,17% КПТ проти 37,57% КП2; серпень–вересень 2010 року 10,87% КПТ проти 37,30% КП2; за станом на січень 2011 року – 11,57% КПТ проти 39,65% КП2. При цьому встановлено, що середня глибина повзунів на колесах марки КП2 дорівнює 1,07мм, а на колесах КПТ – 1,45мм. Водночас, відносна кількість повзунів браковочного рівня глибиною ≥ 1 мм які

формується на колесах марки КП2 при незначних навантаженнях вже на етапі формування поїзду на сортувальних гірках значно більша (19,3%) ніж на колесах марки КПП (7,5%). Цей факт знаходиться у адекватній відповідності до результатів обговорення даних рис.4.

Статистичні дані свідчать про те, що кількість дефектів за позицією «Тільки вищербини» у коліс КП2 та КПП близька: серпень–вересень 2009 року ці показники склали величини 11,54% КПП проти 12,43% КП2; серпень–вересень 2010 року – 13,91% КПП проти 20,27% КП2; за станом на січень 2011 року – 10,57% КПП проти 15,53% КП2, при очевидній перевазі на користь коліс КПП. У відповідності з переважними міцністними характеристиками та твердістю КПП у порівнянні з КП2, аналіз за позицією «Повзуни + Вищербини» стабільно демонструє у всіх випадках перевищення саме цієї характеристики у КПП проти КП2 на >30%: серпень–вересень 2009 року ці показники склали величини 79,81% КПП проти 37,87% КП2; серпень–вересень 2010 року 73,91% КПП проти 38,38% КП2; за станом на січень 2011 року – 76,37% КПП проти 39,65% КП2. При цьому, практично всі вищербини коліс КПП розташовані на повзунах які за розмірами у 1,5 рази перевищують відповідні характеристики дефектів на колесах КП2 (див., також, мал.4).

В роботі було проаналізовано результати дослідження інтенсивності зносу гребенів, як міри експлуатаційної зносостійкості, на підставі поїздних випробувань вагонів із суцільнокатаними колесами різної твердості в складі дослідних маршрутів Роковата–Ужгород–Кошице. Раніше виконаний комісійний розгляд результатів випробувань 2002–2005 рр. [8] встановив, що, за даними пробігу 100 тис.км після відновлення профілю гребенів в умовах вантажних перевезень Роковата–Ужгород–Кошице дослідні колеса продемонстрували підвищення експлуатаційної зносостійкості у порівнянні з серійними (ГОСТ 10791) колесами майже на 39% (38,74 %) [8].

За даними ГНДЛ «Вагони» ДПТУ про експлуатаційні випробування коліс КПП із підвищеною твердістю в порівнянні із серійними колесами КП2 побудований графік залежності зносу гребенів від пробігу (рис.7). Дані випробувань свідчать про те, що після пробігу 91,8тис. км інтенсивність зносу коліс підвищеної твердості не перевищила 0,25мм на 10тис. км пробігу. Цей показник є преференційним у порівнянні з колесами серійної міцності, у яких інтенсивність зносу при аналогічному пробігу дорівнює 0,34мм на 10тис.км. Тобто, за цими даними, зменшення експлуатаційного зносу коліс з підвищеною міцністю КПП у порівнянні з КП2 при інших рівних умовах склало ~36%. Встановлено також, що колеса марки КПП на візках 18–7023 50–ти вагонів нового покоління типу 12–7020 виробництва ВАТ КВБЗ у складі дослідного маршруту «Роковата–Ужгород–Кошице» після пробігу 280 тис. км продемонстрували середній знос гребеня 0,2мм на 10тис. км. При цьому дефектів у вигляді повзунів та вищербин не спостерігалось з початку

випробувань, за окремим винятком – 5 колісних пар, тобто 2,5% від загальної кількості коліс.

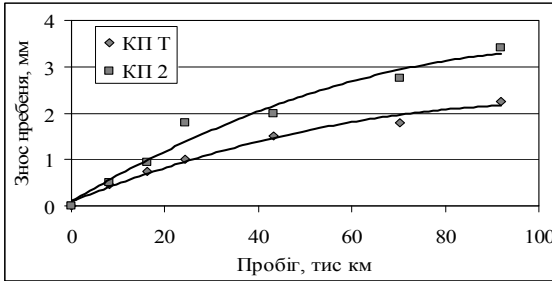


Рис.7. Залежність зносу гребеня коліс від пробігу за даними маршрутних випробувань ГНДЛ «Вагони» ДПТ.

Висновки

1. Аналіз характеру зародження і розвитку тріщин у випадках КП2 та КПТ свідчить про те, що розвиток тріщини і, як наслідок, руйнування не відбувається по «білому шару» з мартенситною структурою. Ця структурна складова є ініціатором зародження тріщини. Принциповий вплив на формування вищербин мають зони термічного впливу взагалі.

2. Встановлено, що при ідентичному наборі структурних зон в сталі КП2 та КПТ, їх розмірні характеристики для кожного із випадків є унікальними. Розмір «білого шару» в сталі КПТ більший за аналогічний для КП2. При цьому сумарна товщина зони термічного впливу зафіксована більшою у сталі КП2 в порівнянні з КПТ.

3. За даними ГНДЛ «Вагони» ДПТу про експлуатаційні випробування коліс із підвищеною твердістю в порівнянні із серійними колесами встановлено, що після пробігу 91,8 тис. км інтенсивність зносу коліс підвищеної твердості КПТ не перевищила 0,25 мм на 10 тис. км пробігу, що є кращим показником у порівнянні з колесами серійної міцності КП2, у яких інтенсивність зносу при аналогічному пробігу дорівнює 0,34 мм на 10 тис. км. Тобто зменшення експлуатаційного зносу коліс з підвищеною міцністю при інших рівних умовах складо 36%.

1. *Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 роки.* – Київ: Укрзалізниця, ДНДЦ УЗ. 2009. – 299с.
2. *Узлов И.Г.* Повышение служебных характеристик железнодорожных цельнокатаных колес при использовании микролегированной стали и оптимизированных параметров термической обработки. / И.Г.Узлов, К.И.Узлов, А.В.Кныш и др.. //Металлургическая и горнорудная промышленность. –2006. – № 3. – С.58–61.
3. *Узлов И.Г.* Промышленное производство высокопрочных железнодорожных колес / И.Г.Узлов, К.И.Узлов, А.В.Кныш, и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 1. – С.98–101.
4. *Вакуленко І.О.* Структурні перетворення в металі залізничного колеса від взаємодії з рейкою. / І.О.Вакуленко, М.М.Грищенко. // Вісник ДПТ. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2008. – №23. – С.175–177.

5. *Пинчук С.И.* Исследование структурных и фазовых изменений, происходящих вблизи поверхности катания железнодорожных колес при эксплуатации. / С.И.Пинчук, С.И.Губенко, Е.В.Белая // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. Научн. Трудов. – Вып. 48, ч.2. – Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – С.11–21.
6. *Бабаченко А.И.* Исследование стойкости к образованию выщербин на поверхности катания железнодорожных колес различных уровней прочности. / А.И.Бабаченко, А.А.Кононенко, П.Л.Литвиненко и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб.научн.тр.ИЧМ. –2010. – Вып.21. – С.196–204.
7. *Бабаченко А.И.* Исследование причин образования дефектов на поверхности катания высокопрочных колес в процессе эксплуатации. / А.И.Бабаченко, А.А.Кононенко, Ж.А.Дементьева и др. // Залізничний транспорт України. – 2010. – №5. – С.35–38.
8. *Узлов И.Г.* Эксплуатационные испытания высокопрочных железнодорожных колес и подготовка к организации их промышленного производства. / И.Г.Узлов, К.И.Узлов, А.В.Кныш, Т.Е.Суровцева // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С.61–65.

*Статья рекомендована к печати
канд. техн. наук А.И.Бабаченко*

***И.Г.Узлов, К.И.Узлов, А.В.Кныш, А.Н.Хулин, Ж.А.Дементьева,
С.В.Мямлин, В.К.Бруякин, Л.А.Мурадян***

Сравнительный анализ причин образования дефектов на поверхности качения углеродистых и повышенной твердости микролегированных цельнокатаных колес

В работе установлены причины образования в процессе эксплуатации дефектов на поверхности качения углеродистых и микролегированных цельнокатаных колес. Проведенный анализ характера зарождения и развития трещин в случаях КП2 и КПТ свидетельствует о том, что развитие трещин и, как следствие, разрушение не происходит по «белому слою» с мартенситной структурой. Эта структурная составляющая является инициатором зарождения трещины. Принципиальное влияние на формирование выщербин имеют зоны термического влияния вообще.