

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-517-541>

УДК 629.76/.78:621.002.3

**О. І. Бабаченко**<sup>1</sup>, чл.-кор. НАН України, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4710-0343

**Г. А. Кононенко**<sup>1,2</sup>, д.т.н., ст. дослідник, ORCID 0000-0001-7446-4105

**Р. В. Подольський**<sup>1</sup>, Ph. D., н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641

**О. А. Сафронова**<sup>1</sup>, м.н.с., ORCID 0000-0002-4032-4275

**О. А. Шпак**<sup>1</sup>, м.н.с.

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

<sup>2</sup> НТУ «Дніпровська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ КОЛЕСА І РЕЙКИ

**Анотація.** Безпека та економічна доцільність залізничного транспорту значною мірою визначаються надійністю та ефективністю роботи пари колесо-рейка. При цьому інтенсивність зношування елементів і швидкість розвитку втомних дефектів повинні бути такими, щоб забезпечувалася економічно доцільна експлуатація рухомого складу та шляхів. Експлуатаційна надійність та довговічність пари колесо-рейка забезпечується за раціонального балансу зношування та зносостійкості. Мета: виконати аналіз різних видів експлуатаційних дефектів, які виникають на поверхні кочення колеса та головки рейки та дослідити структурні зміни в області виникнення цих дефектів. Матеріал та методика досліджень. В роботі проводили аналіз мікроструктури в області робочої поверхні залізничних коліс та рейок, на яких утворилися дефекти під час експлуатації. Досліджувані колеса марок 2, Т були виготовлені за ДСТУ ГОСТ 10791:2016; ER7, ER8 R8 – за EN 13262:2020. Залізничні рейки категорій R260Mn, R370Cr та U75 за EN13674-1:2016. Результати досліджень. Виконаний аналіз видів експлуатаційних дефектів, які виникають на робочій поверхні ободу колеса та головки рейки. Встановлено, що в основному дефекти, які утворюються під час експлуатації, пов'язані з накопиченням теплової та механічної втоми, зносом поверхні контакту колеса-рейка, пластичною деформацією, виникненням повзунів з утворенням мартенситу в зонах, які підлягають інтенсивній дії тепла під час гальмування. Показано, що контактна втома при коченні через різний розподіл результуючої сили для рейок, які підлягають в основному силам тяги, та для коліс, які більше підлягають дії сил гальмування, дефекти можуть виявлятися різною мірою. Щодо дефектів термічного походження, незважаючи на виявлені деякі відмінності (різний за зовнішнім виглядом характер вищербин і структурні відмінності металу в зоні, прилеглій до областей, що містять зазначений дефект), для коліс різних типів та рейок, природа утворення зазначеного дефекту однакова. Зносостійкість в

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

першу чергу визначається рівнем міцності та твердості в парі колесо-рейка, при цьому колесо має бути менш зносостійким. Висновок. Вихідний структурний стан, хімічний склад, рівень механічних властивостей та їх рівномірність, залежать від способу виробництва та можуть впливати на опір утворенню експлуатаційних дефектів на робочій поверхні коліс та рейок. Для забезпечення раціональної ефективної експлуатації залізничного транспорту необхідно обґрунтовано обирати пару колесо-рейка, враховуючи призначення перевезень, рівень твердості, величину навантаження, швидкість руху, хімічний склад та твердість металу колеса та рейки.

**Ключові слова:** зношування, контактна втома кочення, твердість, залізничне колесо, залізнична рейка, тріщина, мікроструктура.

**Посилання для цитування:** Дослідження зв'язку мікроструктури та експлуатаційних дефектів колеса і рейки / О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський, О. А. Сафронова, О. А. Шпак // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 517-541. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-517-541>.

**Актуальність.** Розвиток залізничного транспорту має стратегічне значення в умовах воєнного стану та у період повоєнного відновлення України. Залізничний транспорт наразі використовують для важливих логістичних операцій, які виконують завдання щодо підтримки оборони та виконання міжнародних зобов'язань.

Цей вид транспорту має широкі перспективи розширення застосування у майбутньому, оскільки є достатньо ефективним та екологічним як електричний транспорт. За середніми значеннями викидів CO<sub>2</sub> залізничний транспорт має в 3-5 разів нижчі значення, ніж особистий автотранспорт та важкі вантажні автомобілі, поїздки характеризуються невеликою тривалістю, комфортабельністю та помірною вартістю.

Безпека та економічна доцільність залізничного транспорту значною мірою визначаються надійністю та ефективністю роботи пари колесо-рейка. Застосовувані матеріали для металопрокату залізничного призначення повинні мати високу міцність, щоб сприймати вертикальні та бічні статичні навантаження та динамічні впливи, викликані вертикальними та горизонтальними прискореннями елементів рухомого складу. При цьому інтенсивність зношування елементів і швидкість розвитку втомних дефектів повинні бути такими, щоб забезпечувалася економічно доцільна експлуатація рухомого складу та шляхів.

Контактна втома і знос є конкуруючими механізмами ушкодження і при поєднанні певних умов почергово виникають на залізницях, що призводить до підвищеної змінності коліс та рейок.

Експлуатаційна надійність та довговічність пари колесо-рейка

забезпечується за раціонального балансу зношування та зносостійкості.

**Мета:** виконати аналіз різних видів експлуатаційних дефектів, які виникають на поверхні кочення колеса та головки рейки та дослідити структурні зміни в області виникнення цих дефектів.

**Матеріал та методика досліджень.** В роботі проводили аналіз мікроструктури в області робочої поверхні залізничних коліс та рейок, на яких утворились дефекти під час експлуатації. Досліджувані колеса марок 2, Т були виготовлені за ДСТУ ГОСТ 10791:2016; ER7, ER8 R8 – за EN 13262:2020. Залізничні рейки категорій R260Mn, R370Cr та U75 за EN13674-1:2016.

**Стан питання.** Для виробництва залізничних коліс та рейок традиційно використовують в усьому світі вуглецеві сталі, які містять марганець та кремній. В основному дефекти, які утворюються під час експлуатації, пов'язані з накопиченням теплової та механічної втоми, зносом поверхні контакту колесо-рейка, пластичною деформацією, виникненням повзунів з утворенням мартенситу в зонах, які підлягають інтенсивній дії тепла під час гальмування.

Взаємодія колеса і рейки є фізичною основою руху поїздів по залізничному шляху. Саме воно значною мірою визначає безпеку та найважливіші техніко-економічні показники, як то маса потягу, швидкість їх руху та рівень експлуатаційних витрат. При цьому вимоги до показників взаємодії коліс та рейок суперечливі. В світі фахівці часто говорять о парах (рейка - колесо, колодка-колесо). Однак, в більшості випадків ці окремі деталі створюються різними компаніями або відділами.

**Втома від контакту при коченні (RCF)** є основною причиною серйозних пошкоджень залізничних коліс та основною причиною виходу з ладу коліс у багатьох країнах. Це також є причиною виходу з ладу рейок, які часто піддаються аналогічним пошкодженням. Зазвичай цей дефект розвивається через ініціацію та поширення поверхневих тріщин під дією циклічно повторюваної дії механічного навантаження [1, 2].

Контактна втома при коченні – це втома, пов'язана з дефектом, який індукується в результаті впливу рівнодіючої сили тертя, що повторюється, в додаток до постійного вертикального контактного тиску колеса на рейки, що виявляється на одній і тій же частині колеса. Однак, через різний розподіл результуючої сили, дефекти можуть виявлятися різною мірою. Рейки, в основному, піддаються силам тяги, тоді як колеса більше підлягають дії сил гальмування.

Після утворення кількість втомних тріщин поступово збільшується. Це відбувається через повторюване механічне навантаження на матеріал та гідростатичний тиск рідин, які потрапляють в тріщини з

колеса або головки рейки під час обертання колеса по рейкам. Зростання цих тріщин призводить до відшаровування металу на поверхні кочення колеса. Це може призвести до певних наслідків навіть за короткий час. При цьому відомо про властивість тріщин «зникати» під час зношування.

Контактні поверхні «колесо-рейка», які працюють у відкритих системах, постійно підлягають впливу факторів довколишнього середовища таких як вода, відносна вологість, температура, листва та. В дослідженні [3] двохдисковий пристрій для випробувань на тертя та за умов кочення – ковзання з контрольованою кліматичною камерою використовувалось для виконання експериментів по вивченню впливу високої температури та вологості на зношування та пошкоджуваність рейкової сталі U71Mn. За підвищення температури і вологості овжина тріщини на поверхні рейки постійно зростала та розповсюджувалась до центру матеріалу, що підсилювало конкуренцію між зношуванням і контрактною втомою кочення. Коли знос був менше, ніж втома кочення, поверхні рейок підлягали сильному розтріскуванню.

**Втомне вищерблення.** При високих циклічних напруженнях в контакті на поверхні кочення з'являються тріщини, які поширюються і на більш значну глибину (15- 20 мм). Виникнення тріщин спостерігається також за наявності концентраторів напружень на деякій відстані від поверхні як обода колеса так і головки рейки.

Основною характеристикою, що визначає стійкість сталі проти втомного викришування, є її міцність. Встановлено, що більш високий опір втомному викришуванню має сталь з пластинчастою будовою карбідної фази. Сталі з дрібнозернистою будовою мають більш високий опір пластичній деформації [4, 5]. Неметалеві включення несприятливої форми (строчечні, гострокутні) сприяють виникненню дефектів втомного походження.

**Знос поверхні кочення (RCF).** Зношування колеса – це зміна профілю поверхні кочення, викликаного силами взаємодії його з рейкою [6-8]

Значна частина відмов залізничних коліс/рейок відбувається не в результаті руйнування, а внаслідок зношування поверхонь що труться. За цим видом дефекту обточується, фрезерується та шліфується близько 50% всіх коліс та рейок при ремонті [9, 10] таким чином зменшуючи загальний термін служби [11].

На стійкість проти зношування істотно впливає твердість [12-14]. При виборі оптимального співвідношення міцності елементів пари колесо - рейка рекомендується використовувати комплексний підхід [15, 16]. Для підвищення зносостійкості залізничних коліс та рейок необхідно проводити їх зміцнюючу термічну обробку з метою

отримання в робочому шарі пластинчастих дрібнодисперсних продуктів розпаду аустеніту.

Дослідженню твердості завжди приділяли велику увагу, оскільки цей показник дозволяє побічно судити про деякі фізико-хімічні властивості матеріалу. Характер зміни твердості добре корелює із зносостійкістю. Довгий час вважали, що зношування поверхонь тертя - результат мікрорізання її твердими частинками. Тому зносостійкість пов'язували із підвищенням твердості деталей.

Процесу зношування властиво безперервне деформування, руйнування та відділення на окремих ділянках поверхневого шару зі стабільними властивостями. Знос колеса та рейки впливає на властивості контакту. Наклепаний робочий шар металу на поверхні кочення коліс деформується. Якщо твердість поверхні кочення нового ободу становить 255-320 НВ, то наклепаного досягає 600НВ. При цьому твердість змінюється не тільки вздовж профілю поверхні кочення, а й у глиб колеса від максимального значення до твердості вихідного матеріалу. При русі рухомого складу, особливо в кривих ділянках шляху, виникають навантаження і тертя між гребенем і головкою зовнішньої рейки, що призводить до більш інтенсивного зносу. Ці негативні явища зростають із зменшенням радіусу кривих, зростанням осьових навантажень та швидкостей руху. Так, зі збільшенням швидкості на 10 км/год підвищуються бічні сили на 4-14%, які пропорційні вертикальному тиску колеса на рейку.

В ідеальному випадку для забезпечення мінімальної взаємодії зі шляхом візок має рухатись по рейковій колії прямолінійно, без набігання гребенями коліс на рейки. Однак під дією нерівностей верхньої будови шліху і на поверхні кочення коліс колісна пара здійснює складні перміщення у просторі, які через букси та ресорне підвішування передаються візку. Конусність поверхні кочення коліс і підуклона рейок сприяють прямолінійному руху екіпажу в прямих ділянках без набігання гребеня колеса на рейку. Вона ж забезпечує вписування в криві, компенсуючи різницю дотичної швидкості коліс, які котяться по зовнішній та внутрішній рейці, до того моменту, поки зовнішнє колесо починає проковзувати по рейці і виникають додаткові поздовжні сили між гребенем колеса і робочою гранню зовнішньої рейки.

Зі зростанням навантаження збільшується обсяг поверхневих шарів металу, які піддаються деформації, що призводить до підвищення температури при контакті колеса та рейки.

Англійські дослідники Спура та Ньюкомб довели, що інтенсивність зношування прямо пропорційна навантаженню та зробили висновок, що зі зростанням навантаження на колісну пару колеса швидше зношуються, а при неправильному розподілі навантаження на колесо

знижується пробіг колісних пар.

Взаємодію між зношуванням та контактною втомою за мокрого контакту досліджували за допомогою експерименту на двохдисковому стенді. Зразки різних сталей залізничних коліс були поєднані в пари зі зразками однієї й тієї ж сталі рейкової сталі, яка підлягала мокрому контакту кочення, ковзання і ковзання з різним співвідношенням ковзання/кочення [17]. Підвищення тиску рідини, захопленої в поверхневих тріщинах, було причиною швидкого і серйозного пошкодження за випробувань в умовах сухого та вологого стану через зародження поверхневих тріщин в результаті храпового механізму в сухій фазі, які в подальшому розповсюджуються у вологій фазі.

Коли поверхневі тріщини підлягають вологому контакту через дощ або сніг, які падають на поверхню контакту колесо-рейка, вони можуть швидко розповсюджуватись всередину під дією тиску рідини, захопленої всередині тріщини, викликаючи дуже серйозні пошкодження [18].

Для попередження розвитку сітки тріщин і утворення вищербин колеса зазвичай через рівні проміжки часу перепрофілюють. Ця практика є вартісною та скорочує термін експлуатації колеса, але вона необхідна з міркувань безпеки, оскільки відшаровування матеріалу від кола кочення колеса може мати серйозні наслідки. Пластична деформація кола кочення також може призвести до зміни профілю поперечного перерізу та овальності. Знос може призвести до руйнування ободу, тонкому гребню і некруглості.

**Білий шар, повзун.** Стан колії та колісних пар чинить вирішальний вплив на вертикальні та горизонтальні сили. Кочення колеса по рейці здійснюється по вузькій полосі кола кочення. При цьому вимагається ідеально кругле колесо і пласка поверхня рейки. Якщо у колеса буде наявний повзун або овальність, за кожного обертуса рейка буде підлягати ударним навантаженням і реакція від цих ударів буде передаватись на підрейкову основу, а також на ресорне підвішування та кузов рухомого складу, погіршуючи умови перевезення. Подібні явища відбуваються за наявності нерівностей у рейок. З врахуванням того, що колісна пара має невідресорену масу 1,5 т, динамічний вплив виходить досить значним [19].

Повзуни є найбільш характерним дефектом колеса. Повзуни зазвичай утворюються внаслідок повного або часткового блокування колісної пари, в той час як рухомий склад все ще рухається зі швидкістю. Досягають значної величини сили тертя (різниця між частотою обертання колеса та лінійною швидкістю рухомого складу) між стаціонарним колесом та головкою рейки. Невірне уявлення про повзуни складається, коли говорять що вони утворюються через стирання коліс в

результаті ковзання по головці рейки. Насправді цей дефект відносять до термічних дефектів, він виникає в результаті значної тепловіддачі під час ковзання, внаслідок чого і утворюється більшість дефектів, в деяких випадках все ж проявляється мі механічне зношування. Коли колесо ковзає по рейці, результуюче терті нагріває поле зчеплення до значної температури (800 - 850°C), преобразуючи при цьому перліт сталі в аустеніт. Під час виходу нагрітої ділянки з зони контакту, відбувається його миттєве охолодження, особливо коли колесо обертається і торкається до холодної сталі головки рейки, шляхом такого швидкого охолодження аустеніт перетворюється на мартенсит.

**Навари і термічні тріщини.** Застосування композиційних гальмівних колодок збільшило вихід коліс з ладу по наварам і термічним тріщинам [20]. Навари (наволочування металу на поверхню кочення) утворюються при певних умовах гальмування, коли має місце ковзання колеса по рейці з незначним імпульсним поворотом. Структура наволочуваних ділянок металу, як і повзунів, представлена мартенситом. Його утворення пов'язане з впливом на поверхню високого тиску і температури. За місцем наварів при подальшій експлуатації також утворюються вищербини. При роботі в системі колесо/рейка в умовах різких повторюваних гальмувань на поверхні кочення утворюються термічні тріщини, які є наслідком збільшеного теплового навантаження на обод: за рахунок застосування композиційних колодок: приблизно 95-97% тепла гальмування відводиться колесом і тільки 3-5% розсіюється колодкою [21] в той же час при гальмуванні обод колеса при взаємодії з рейкою нагріває поверхню кочення головки рейки, тим самим підвищуючи її температуру, через що виникають термічні тріщини на головці рейки. Утворені на поверхні кочення термічні тріщини найчастіше переходять в вищербини. Ці дефекти утворюються як у випадках, коли температура поверхні перевищує критичні точки сталі, так і при більш низьких температурах. В останньому випадку тріщини є наслідком циклічних температурних напружень, що перевищують границю втоми сталі.

Вирішальний вплив на частоту утворення цього типу пошкоджень надає вміст вуглецю. Підвищення опору викришуванню гальмівного типу може бути досягнуто шляхом вибору сталі, хімічний склад якої забезпечує підвищення значень критичних точок, мінімальну схильність до утворення загартованих ділянок, а також мінімальну крихкість мартенситу, що утворюється на поверхні тертя коліс. Основними механічними характеристиками, що впливають на схильність вуглецевих сталей до утворення термічних тріщин, є пластичність і в'язкість, що залежать від вмісту вуглецю та структурного стану.

**Вищербини.** Відомо, що на утворення вищербин впливає цілий ряд факторів експлуатаційного і матеріалознавчого характеру [11, 22-23]. До перших відносяться інтенсивність гальмування, швидкість руху вагона, стан гальмівної системи і ін. Матеріалознавчими факторами в першу чергу є хімічний склад колісної та рейкової сталі та їх рівень твердості [24-27].

**Руйнування.** Це явище ініціюється концентраторами напружень у вигляді втомних тріщин і термічних тріщин. Спостерігаються і крихкі (раптові) руйнування коліс та рейок. Дослідження коліс та рейок, що були крихко зруйновані, показали, що крім названих однією з причин зламів може бути і високий рівень залишкових напружень, що виникають в процесі виготовлення коліс та рейок [21]. Крихке руйнування виникає при цьому в результаті накладення робочих (насамперед теплових) напружень на залишкові. Схильність сталі до крихкого руйнування в значній мірі визначається її властивостями.

З аналізу наявних поглядів щодо утворення експлуатаційних дефектів випливає, що в основному вони зосереджені на розподілі напружень від механічних навантажень та візуальних зовнішніх характеристиках поверхні контакту ободу колеса то головки рейки. Відомі деякі дослідження, які враховують структурний стан та хімічний склад матеріалів, рівень та співвідношення твердості пари колесо-рейка. Але вплив хімічної та структурної мікронеоднорідності вивчений недостатньо.

**Результати досліджень.** Періодичне навантаження на поверхню обода колеса і сили тертя, що діють, призводять до місцевої пластичної деформації. Як тільки за рахунок пластичної деформації збільшиться деформованість матеріалу, паралельно куту даної деформації утворюються тріщини та формуються дефекти втоми від контакту при коченні (рис. 1 та рис. 2). Утворення таких тріщин відбувається під кутом до робочої поверхні, потім вони змінюються напрямом і надалі не заглиблюються.

Механізм зношування коліс та рейок не завжди однаковий. Теплові явища, що відбуваються на поверхні, в значній мірі визначаються і супроводжуються процесами пластичної деформації. При невеликому прослизанні зношування може відбуватися в основному за рахунок відділення пластично деформованих частинок металу. У поверхневих шарах металу внаслідок зміцнення від наклепання і втрати пластичності з'являються мікроскопічні тріщини, розвиток яких і призводить до відокремлення частинок металу колеса та рейки (рис. 3, рис. 2 відповідно). При терті кочення з ковзанням зношування відбувається також за рахунок стирання - механічного відриву від поверхні деформованих, окислених або зі зміненою структурою частинок металу.



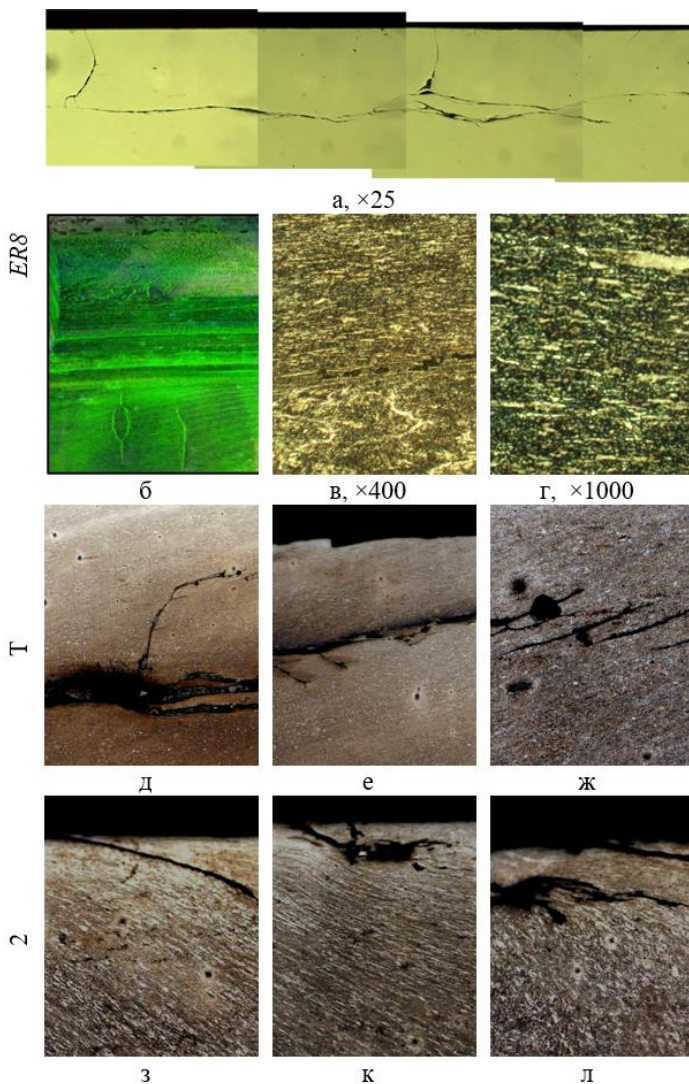


Рисунок 1 – Втомне пошкодження поверхні кочення залізничних коліс марки ER8, 2 та Т: а- магістральна втомна тріщина, що утворилась під поверхнею кочення, б- магніто-порошковий контроль зони з дефектом (тріщина), в- пластична деформація металу з початком формування тріщини, г-основний метал поверхні кочення після експлуатації, д- місце зародження магістральної втомної тріщини; е- вихід втомної тріщини на поверхню кочення; ж- вершина одного з відгалужень магістральної тріщини, з, к, л- утворення втомних тріщин в ободі колеса зі сталі марки 2

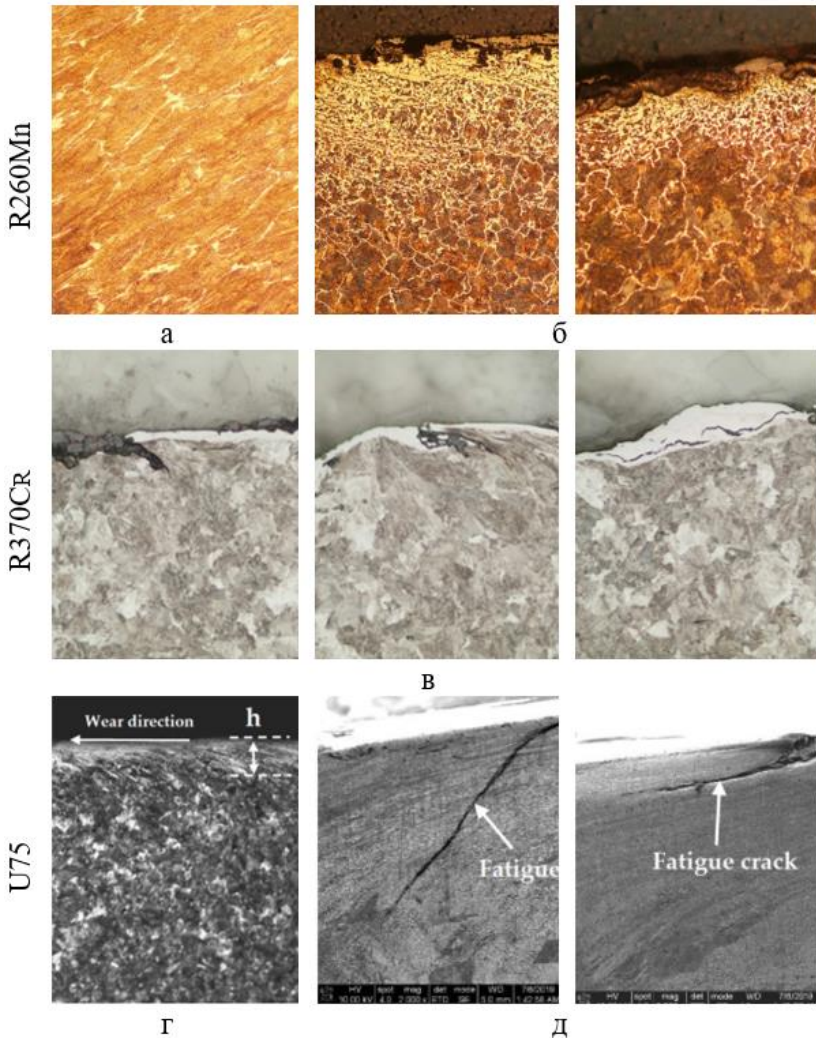


Рисунок 2 - Втомне пошкодження та зношування поверхні кочення залізничної рейки R260Mn [28], R370Cr [29] та U75 [30]: а – пластична деформація металу R260Mn, б – місце зародження термічної тріщини по області «білого» шару R260Mn, в - місце зародження магістральної втомної тріщини по області «білого» шару R370Cr; г - пластична деформація металу U75 в результаті зношування; д - розвиток магістральної втомної тріщини U75

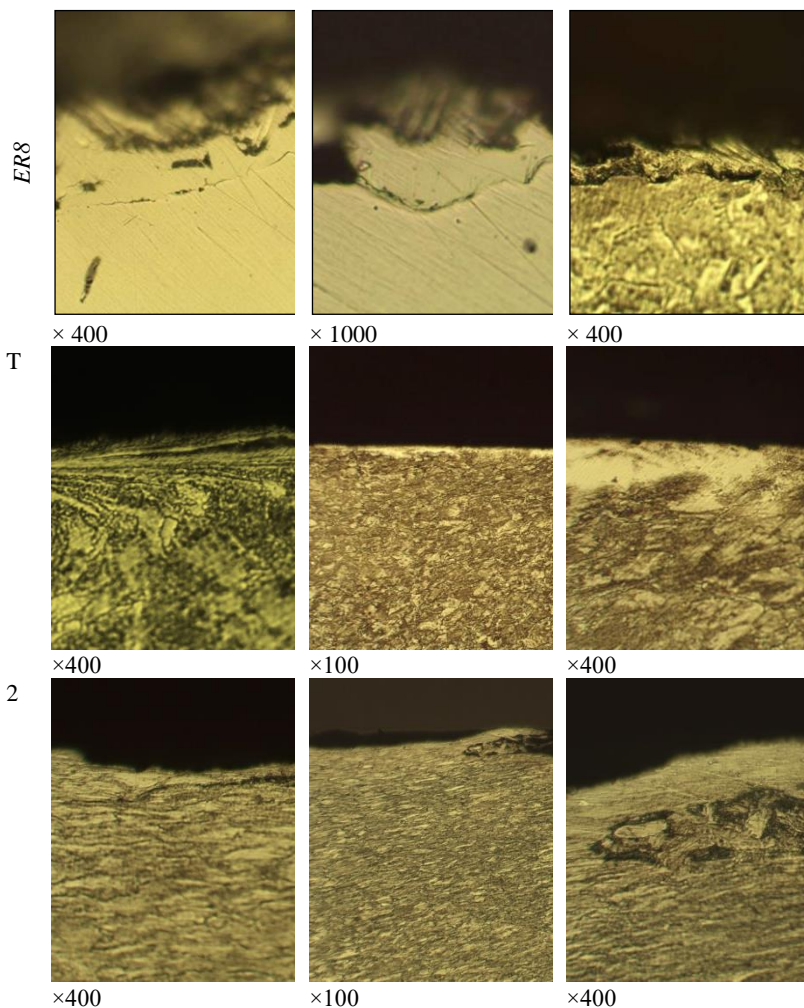


Рисунок 3 –Зношування поверхні кочення залізничних коліс марки ER8, 2 та Т

Дослідження мікроструктури, проведені на шліфах (рис. 4 та рис. 5), травлених в 3-4% розчині  $\text{HNO}_3$ , показали, що в поверхневих шарах обода колеса та головці рейки поблизу дефектів присутня слабо витравлювана область, яка в літературі [31-34] називається «білий шар». Вона являє собою структуру високовуглецевого мартенситу (обод зі сталі марки Т, головка рейки R370Cr та U75) або структуру високовуглецевого мартенситу з трооститною сіткою (обод колеса зі

сталі марки 2, ER7, та головки рейки R260Mn) (рис. 4 та рис. 2 відповідно). Товщина білого шару в досліджуваних ділянках становила до 1 мм для обода колеса зі сталі марки 2 та ER7 та головки рейки R260Mn, а для обода колеса зі сталі марки Т та головки рейки R370Cr та U75 - становила близько 2 мм, максимальна спостережувана глибина поширення тріщини - близько 3 мм.

Дослідження мікроструктури в області дефекту «вищербини на повзуні» показали (рис. 5), що в поверхневих шарах обода присутні тріщини різної довжини, які поширюються від поверхні кочення вглиб обода. Як правило, тріщини, що утворилися на поверхні кочення, проникають в глиб практично перпендикулярно до поверхні кочення на глибину, відповідну товщині металу, що зазнав зміни в процесі експлуатації, а потім змінюють напрямок свого руху майже на 90° і поширюються уздовж границі між білим шаром і металом, що не підлягав структурним змінам в процесі експлуатації.

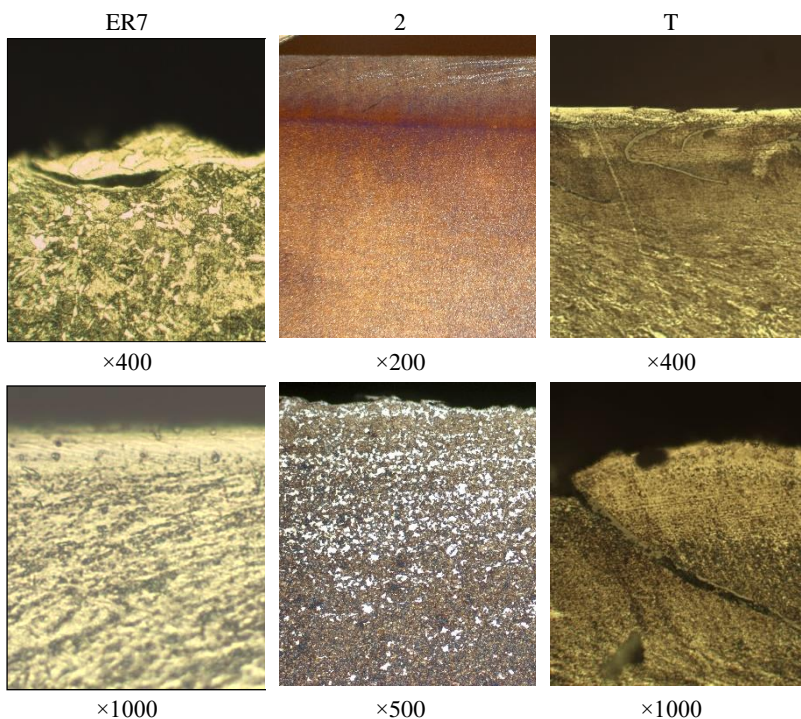


Рисунок 4 – Мікроструктура поверхні кочення колеса марки ER7, 2 та Т після експлуатації з сформованим «білим» шаром

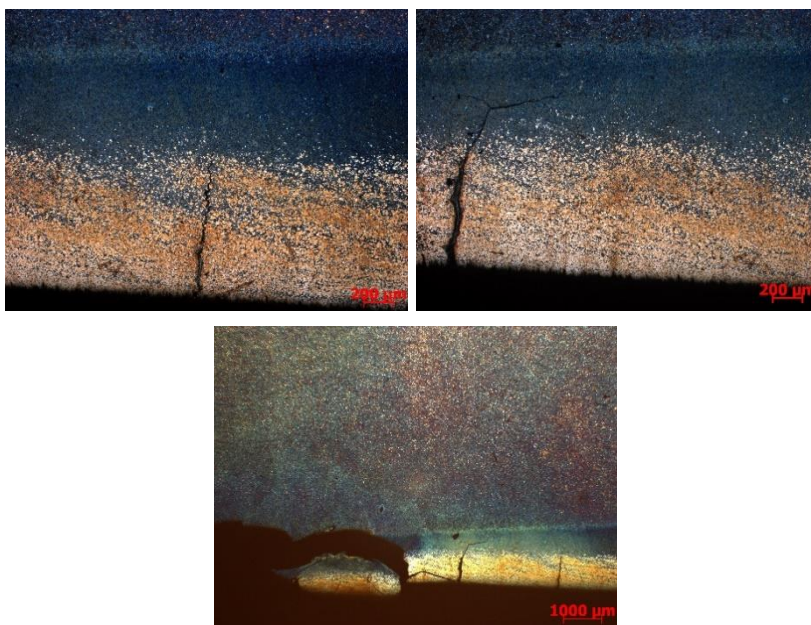


Рисунок 5 – Розвиток тріщини на повзуні в сталі марки 2

Зазвичай, тріщини, які утворились на поверхні кочення досліджуваного колеса, розповсюджуються вздовж границі між білим шаром і металом (рис. 5), в якому не проходили структурні зміни в процесі експлуатації. Тріщини, які розповсюджувались від вищербини на більшу глибину не були виявлені. При дослідженні дна вищербини встановлено, що на деяких вершинах рельєфу залишається перехідна структура від білого шару – спостерігаються невеликі ділянки структури з мартенситом, що свідчить про відповідність глибини вищербини і ширини «білого шару» (рис. 6).

Результати досліджень також показали, що руйнування поверхневих шарів ободу колеса під дією тангенціальних напружень і утворення вищербин відбувається з помітною пластичною деформацією, про що свідчить явно виражена текстурованість структури металу в осередку руйнування в напрямку дії тангенціальних напружень (рис. 6).

Дослідження мікроструктури за перерізом ободу від дна вищербини показали, що на глибині більше 10 мм спостерігалась поступова зміна мікроструктури основного металу: від голчастої морфології вона набувала структуру перліту з невеликою кількістю структурно вільного фериту, який виділяється у вигляді переривчастої сітки по границям зерен.

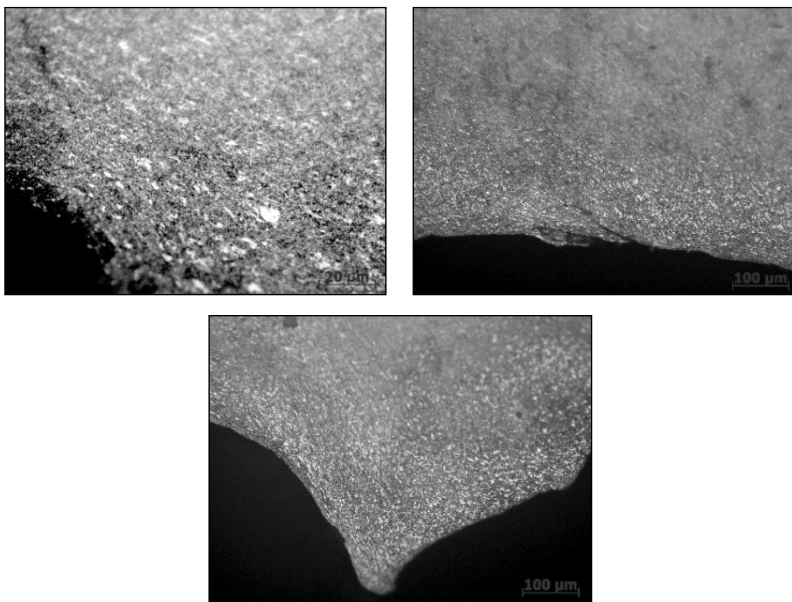


Рисунок 6 - Мікроструктура дна вищербини колеса із сталі марки 2

Також аналіз мікроструктури показав, що пошкодження поверхневих шарів головки рейки (рис. 2) під дією тангенціальних напружень та утворення вищербин відбувається з помітною пластичною деформацією, про що свідчить явно виражена текстура структури металу в осередку руйнування в напрямку дії тангенціальних напружень.

Таким чином, результати досліджень структурного стану металу ободів коліс марки ER7, ER8, 2 і Т та головок рейок R260Mn, R370Cr та U75 -[28,35-36] з дефектами на поверхні кочення показали, що в результаті теплового впливу в процесі експлуатації коліс та рейок в поверхневих шарах утворюються «білі шари» - крихка структурна складова високовуглецевого мартенситу, викришування якої під впливом контактних напружень призводить до утворення вищербин термомеханічного походження.

Незважаючи на виявлені деякі відмінності (різний за зовнішнім виглядом характер вищербин і структурні відмінності металу в зоні, прилеглий до областей, що містять зазначений дефект), для коліс різних типів та рейок, природа утворення зазначеного дефекту однакова. Механізм їх утворення можна представити в такий спосіб. При експлуатації в процесі гальмування колеса в зоні контакту з рейкою

відбувається високотемпературне швидке нагрівання металу вище  $A_{C3}$  і подальше його охолодження. Як встановлено численними дослідженнями [39-43], незалежно від хімічного складу і вихідної структури сталі, в цих областях відбувається фазова перекристалізація металу, і утворюється нова структурна складова – так званий безструктурний мартенсит, або «гарденіт». Структурні перетворення в локальних областях колеса та рейки призводять до об'ємних змін, що викликає внутрішні напруження, ослаблення міжзереного і міжфазних зв'язків між основним металом і новою структурною складовою і, як наслідок, появу мікротріщин. Високі, ударні та циклічні навантаження полегшують зародження і зростання мікротріщин і призводять до того, що під дією дотичних контактних напружень в зоні контакту «колесо-рейка» з поверхні обода колеса та поверхні головки рейки сколюються часточки крихкої фази.

Виявлені відмінності в характері викришування «білого шару» і в структурних змінах металу, безпосередньо прилеглого до зони спостережуваного дефекту, для коліс досліджуваних марок сталі крім хімічного складу і вихідної структури, можуть бути обумовлені різними умовами експлуатації, характером високотемпературного і силового впливу на метал.

Ще одним механізмом утворення вищербин на поверхні кочення є втомне руйнування. Контактні напруження призводять до утворення сітки втомних тріщин, від яких згодом починають розростатися більші тріщини. Це розростання в значній мірі залежить від таких експлуатаційних параметрів, як швидкість руху, сила тяги, ступінь використання сил зчеплення і ковзання. Таким чином контактено-втомні викришування можуть привести до зламів, які представляють макроскопічний відкол, що класифікується як вищербина, яке призводить до необхідності передчасного обточування колісних пар.

При дослідженні металу ободів коліс та головки рейки різного хімічного складу встановлено, що утворення вищербин втомного походження не пов'язане з виникненням нової фази. Зародження тріщини може відбуватися на деякому поглибленні від поверхні кочення в області з несприятливою системою напружень, наприклад в місці скупчення включень, що є концентраторами напружень. Далі розвиток тріщин відбувається в напрямку до поверхні кочення з викиданням бічних відгалужень від магістральної тріщини (рис. 6 та рис. 7).

Залежно від хімічної та структурної неоднорідності реакція на дію експлуатаційних навантажень (теплових та механічних) може відрізнитись. Локальний розподіл хімічних елементів та структурних складових залежить від способу виробництва залізничного колеса (суцільнокатане або лите).

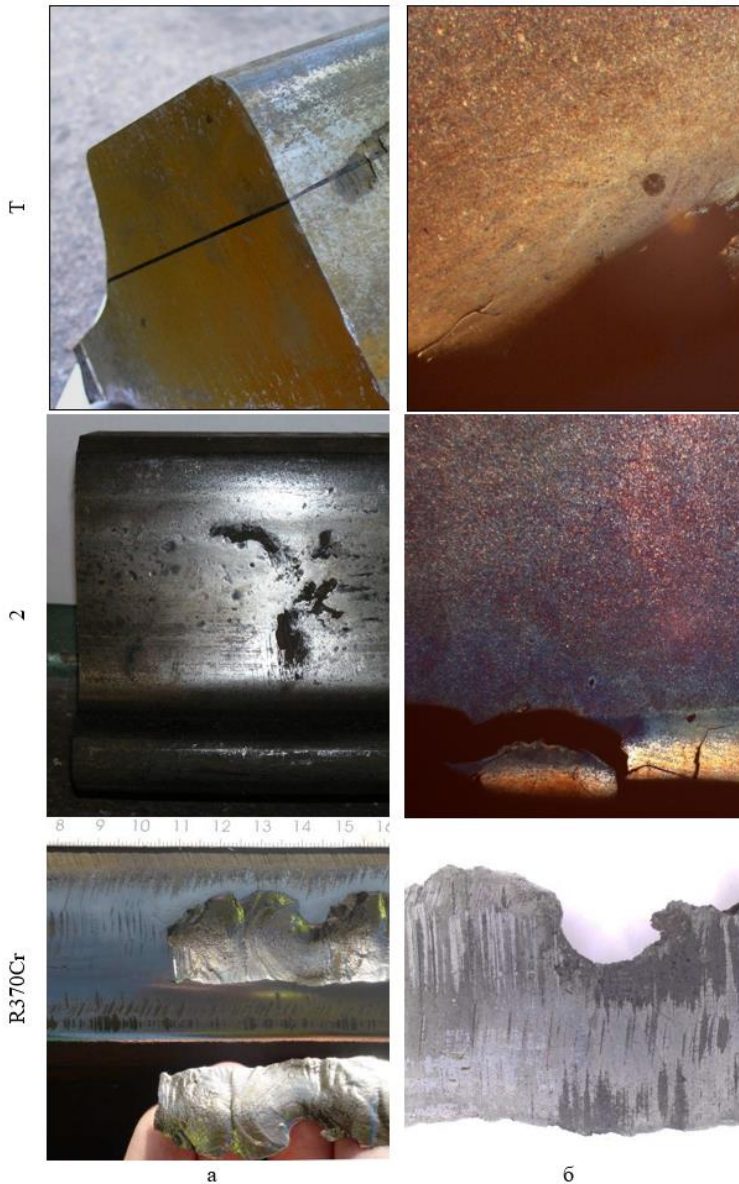


Рисунок 7 – Загальний вид (а) та мікроструктура (б) досліджуваних фрагментів ободів коліс марки 2 та марки Т та головки рейки R370Cr [38] з вищербинами на повзуні



Формування структурного стану і комплексу властивостей сталюого виробу відбувається на всіх стадіях виробництва: виплавки, розкислення і розливання, температурно-деформаційної обробки на прокатному переділі, термічної і механічної обробки готової продукції.

Макроструктура та розподіл хімічних елементів у литому колесі формуються під час затвердіння сталі. Первинна кристалізація починається з того, що при зниженні температури в окремих точках розплаву виникають центри кристалізації, довкола яких в строго кристалічному порядку організуються атоми, ростуть і розвиваються кристали за рахунок оточуючої рідкої маси сталі. При виробництві суцільнокатаних коліс та рейок є наступний етап виробництва після кристалізації злитка – гаряча пластична деформація.

Прокатка і ковка створюють у сталі волокнисту будову. Дендрити і крупні зерна литого злитка дробляться з отриманням подовжених скоклів (волокон), які направлені вздовж прокатки; міждендритний простір, який багатий на домішки і містить неметалеві включення, також деформуються і утворюють волокна, які при травленні макроструктури швидше роз'їдаються та темнішають. Механічні властивості кованого металу різні в різних напрямках. У сталі вони зазвичай вищі вздовж напрямку прокатки і нижче поперек, так як більше багаті шкідливими домішками і неметалевими включеннями волокна відрізняються меншою в'язкістю. Якщо навантаження відбувається вдовж цих волокон, то опір удару і пластичність їх різко знижуються. Тому шляхом кування і гарячого штампування прагнуть отримати такий розподіл волокон, щоб напруження діяли не паралельно, а перпендикулярно. Тріщина зазвичай проходить по неміцному волокну, збагаченому домішками і неметалевими включеннями. При тепловій дії, яка виникає під час експлуатації, фазовим перетворенням в першу чергу підлягають ділянки, які збагачені домішковими елементами, оскільки вони знижують температури фазових перетворень та зміщують кінетику фазових перетворень у бік їх прискорення.

Наступним етапом виробництва металопродукції залізничного призначення може бути термічна обробка, яка призводить до подрібнення зеренної структури, подрібнення складників перлітної структури, подрібнення феритної сітки. Така структура обумовлює більш високі механічні властивості, і робить виріб більш надійним, ніж крупнокристалічний.

*Результати отримані в рамках Українсько-німецького проекту «Вплив структурної та хімічної неоднорідності на зносостійкість та поширення втомних тріщин в місці контакту колесо-рейка» (номер держреєстрації 0124U003037) за договором М14-2024/КС.0227.24 від 30.04.2024.*

## Висновки

Достатня зносостійкість сприяє тривалому збереженню геометрії профілю та коректному розподілу навантажень у плямі контакту. Однак, за умов коли метал вздовж поверхні контакту тривалий час підлягає дії експлуатаційних навантажень, структура зазнає змін: виникає локальна деформація, насичення дислокаціями, можуть зароджуватися та розвиватися втомні тріщини. Тому певна міра зношування, в результаті якого може зменшуватись довжина втомних тріщин від поверхні та видалення деструктурованого металу є корисним процесом.

Утворення дефектів відбувається зі зміною структури під поверхню контакту в результаті інтенсивної пластичної деформації, фазових перетворень, утворення та розвитку тріщин. Вихідний структурний стан, хімічний склад, рівень механічних властивостей та їх рівномірність, залежать від способу виробництва та можуть впливати на опір утворенню експлуатаційних дефектів на робочій поверхні коліс та рейок.

Для забезпечення раціональної ефективної експлуатації залізничного транспорту необхідно обґрунтовано створювати пару колесо-рейка, враховуючи призначення перевезень, рівень твердості, величину навантаження, швидкість руху, хімічний склад та твердість металу колеса та рейки.

## Перелік посилань

1. Bhushan B. *Modern Tribology Handbook*, CRC Press. Boca Raton. 2001. Vol II. P. 1271–1326.
2. Deuce R. Wheel tread damage—An elementary guide. Technical report 100115000. *Bombardier Transportation GmbH*. 2007. 38 p.
3. He C., Zhang P., Zhu R., Ye R., Li P., Liu J. Experimental study of the effects of temperature and humidity on the wear and damage behavior of U71Mn rail steel. *Wear*. 2003. P. 524–525. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204827>
4. Узлов И. Г., Бабаченко А. И., Кононенко А. А., Сафронов А. Л. Эффективность различных показателей оценки надежности железнодорожных колес. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 1. С. 70-74.
5. Державна Інструкція з огляду, обстеження та формування вагонних колісних пар. а адміністрація залізничного транспорту України «Укрзалізниця» Київ. 2006 р. 40с.
6. Wang X., Lei L., Yu H.A. Review on Microstructural Features and Mechanical Properties of Wheels/Rails Cladded by Laser Cladding. *Micromachines*. 2021. Vol. 12. P. 152. <https://doi.org/10.3390/mi12020152>
7. Lu P., Lewis S. R., Fretwell-Smith S., Engelberg D. L., Fletcher D. I., Lewis R. Laser Cladding of Rail; the Effects of Depositing Material on Lower Rail Grades. *Wear*. 2019. P. 438–439. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203045>

8. Roy T., Lai Q., Abrahams R., Mutton P., Paradowska A., Soodi M., Yan W. Effect of Deposition Material and Heat Treatment on Wear and Rolling Contact Fatigue of Laser Cladded Rails. *Wear*. 2018. P. 412–413. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.001>
9. Krishna V., Hossein-Nia S., Casanueva C., Stichel, S. Long term rail surface damage considering maintenance interventions. *Wear*. 2020. Vol. 460–461. P. 203462. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203462>
10. Borja R., Albi S. E., Unai A., Jose M. M., Javier N. Prediction of Rolling Contact Fatigue Behavior in Rails Using Crack Initiation and Growth Models along with Multibody Simulations. *Appl. Sci*. 2021. Vol. 11. P. 1026. <https://doi.org/10.3390/app11031026>
11. Ekberg A., Åkesson B., Kabo E. Wheel/rail rolling contact fatigue—Probe, predict, prevent. *Wear*. 2014. Vol. 314. P. 2–12. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.004>
12. Faccoli M., Zani N., Ghidini A., Petrogalli C. Tribological Behavior of Two High Performance Railway Wheel Steels Paired with a Brake Block Cast Iron. *Tribol. Trans*. 2021. No. 65. P. 296–307. <https://doi.org/10.1080/10402004.2021.2011997>
13. Miranda R. S., Rezende A. B., Fonseca S. T., Fernandes F. M., Sinatora A., Mei P. R. Fatigue and Wear Behavior of Pearlitic and Bainitic Microstructures with the Same Chemical Composition and Hardness Using Twin-Disc Tests. *Wear*. 2022. Vol. 494–495. P. 204253. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204253>
14. Zeng D., Qiao S., Chen X., Gong Y., Jiang B., Zhao H., Zhang J., Lu L. Rolling Contact Fatigue and Wear Behavior of a Vanadium Microalloyed Railway Wheel Steel under Dry Rolling / Sliding Condition. *International Journal of Fatigue*. 2024. Vol. 182. P. 108207. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108207>
15. Hu Y., Watson M., Maiorino M., Zhou L., Wang W. J., Ding H. H., Lewis R., Meli E., Rindi A., Liu Q. Y., Guo J. Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values. *Wear*. 2021. Vol. 182, P. 203831. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203831>
16. Girsch G., Heyder R. Advanced pearlitic and bainitic high strength rails promise to improve rolling contact fatigue resistance. *Proc. 7th World Cong. on Railway Research*. 2006. P.1-9.
17. Mazzu` A., Petrogalli C., Lancini M., Ghidini A., Faccoli M. Effect of Wear on Surface Crack Propagation in Rail–Wheel Wet Contact. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. No. 27. P. 630–639. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3185-1>
18. Farhangdoost K., Kavoosi M. Effect of Lubricant on Surface Rolling Contact Fatigue Cracks. *Adv. Mat. Res*. 2010. Vol. 97–101. P. 793–796.
19. Crawshaw, Ph. The Permanent Way Institution. 1997. No.3. P. 232 – 239.
20. Faccoli M., Petrogalli C., Ghidini A. SANDLOS® wheels for desert environments. *The LRS TECHNO*. 2017. No.10. P. 1-10.
21. Осташ О. П., Анофрієв В. Г., Андрейко І. М., Мурадян Л. А., Кулик В. В. Про концепцію вибору сталей для високоміцних залізничних коліс. *Фізико-*

хімічна механіка матеріалів. 2012. Т. 48, № 6. С. 7-13.

22. Andersson R., Ahlstrom J., Kabo E., Larsson F., Ekberg A. Numerical investigation of crack initiation in rails and wheels affected by martensite spots. *Int J Fatigue*. 2018. Vol. 114. P. 238–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.05.023>

23. Zhang S. Y. Rail rolling contact fatigue formation and evolution with surface defects. *Int J Fatigue*. 2022. Vol. 158. P. 106762. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106762>.

24. Дацишин О., Глазов А. Оцінювання довговічності тіл кочення за утворенням типових контактних-втомних пошкоджень – пітингу і відшарування. *Вісник ТНТУ*. 2013. Том 71, №3. С.75-87.

25. Узлов И. Г., Гасик М. И., Есаулов А. Т. Колесная сталь. К. : Техник. 1985. 168 с.

26. Козловський А. І., Шрамко О. В., Данченко В. М., Узлов І. Г., Польський Г. М., Горб С. В., Соловійов С. Е., Чуприна Л. В., Грінкевич В. О., Бабаченко О. І., Голубева Л. В. Пат. 74116 Україна, МПК С2 В21J5/10, В21К1/28 Спосіб виробництва суцільнокатаних залізничних коліс /; замовник і патентовласник ВАТ «Нижньодніпровський трубопрокатний завод», Бюл. № 10. 4 с.

27. Узлов И. Г., Узлов К. И., Перков О. Н. Высокопрочные железнодорожные колеса из микролегированной ванадием стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. №1. С. 84-88.

28. Msomi V., Basson C.S. P., Mabuwa S. Microstructural analysis of rail tracks defects: case study. *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 892. P. 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/892/1/012002>

29. Steenbergen M. Rolling contact fatigue in relation to rail grinding. *Wear*. 2016. Vol.356-357. P. 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.015>

30. Fei J., Zhou G., Zhou J., Zhou X., Li Z., Zuo D., Wu R. Research on the Effect of Pearlite Lamellar Spacing on Rolling Contact Wear Behavior of U75V Rail Steel. *Metals*. 2023. No. 13. P.237. <https://doi.org/10.3390/met13020237>

31. Grassie S. L., Fletcher D. I., Gallardo Hernandez E. A., Summers P. Studs: a squat-type defect in rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012. Vol. 226, No. 3. P. 243–56. <https://doi.org/10.1177/0954409711421462>

32. Liu C.-P., Liu P.-T., Pan J.-Z., Chen C.-H., Ren R.-M. Effect of Original Microstructure on Wear Property of ER9 Wheel Steel. *Ironmak. Steelmak*. 2021. No. 48. P. 133–141. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.174128>

33. Hieu Nguyen B., Al-Juboori A., Zhu H., Zhu Q., Li H., Tieu K. Formation Mechanism and Evolution of White Etching Layers on Different Rail Grades. *Int J Fatigue*. 2022. P. 107100. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107100>

34. Al-Juboori A. Characterisation of White Etching Layers formed on rails subjected to different traffic conditions. *Wear*. 2019. Vol.436–437. P.202998. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202998>.

35. Steenbergen M. Rolling contact fatigue in relation to rail grinding. *Wear*. 2016. Vol. 356-357. P.110-121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.015>

36. Fei J., Zhou G., Zhou J., Zhou X., Li Z., Zuo D., Wu R. Research on the Effect of Pearlite Lamellar Spacing on Rolling Contact Wear Behavior of U75V Rail Steel. *Metals*. 2023. No.13. P.237. <https://doi.org/10.3390/met13020237>
37. Steenbergen M. Rolling contact fatigue in relation to rail grinding. *Wear*. 2016. Vol. 356-357. P.110-121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.015>
38. Grassie S. L., Fletcher D. I., Gallardo Hernandez E. A., Summers P. Studs: a squat-type defect in rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012. Vol. 226, No. 3. P. 243–56. <https://doi.org/10.1177/0954409711421462>
39. Rocha R. C., Ewald H., Rezende A. B., Fonseca S. T., Mei P. R. Using twin disc for applications in the railway: A systematic review. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2023. No. 45. P. 191. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04104-1>
40. Fei J., Zhou G., Zhou J., Zhou X., Li Z., Zuo D., Wu R. Research on the Effect of Pearlite Lamellar Spacing on Rolling Contact Wear Behavior of U75V Rail Steel. *Metals*. 2023. No. 13. P. 237. <https://doi.org/10.3390/met13020237>
41. Rahaman M. L., Bernal E., Spiriyagin M., Bosomworth C., Sneath B., Wu Q., Cole C., McSweeney T. An Investigation into the Effect of Slip Rate on the Traction Coefficient Behaviour with a Laboratory Replication of a Locomotive Wheel Rolling/Sliding along a Railway Track. *Tribol. Int.* 2022. Vol. 187. P. 108773, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108773>
42. Pan R, Ren R, Chen C., Zhao X. The microstructure analysis of white etching layer on treads of rails. *Eng Fail Anal.* 2017. No. 82. P. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.018>

## References

1. Bhushan, B. (2001). *Modern Tribology Handbook*. CRC Press. Vol. II, Boca Raton, 1271–1326
2. Deuce, R. (2007). *Wheel tread damage – An elementary guide*. Technical report 100115000, Bombardier Transportation GmbH, p. 38
3. He, C., Zhang, P., Zhu, R., Ye, R., Li, P. & Liu, J. (2003). Experimental study of the effects of temperature and humidity on the wear and damage behavior of U71Mn rail steel. *Wear*, 524–525, 204827 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204827>
4. Uzlov, I. G., Babachenko, A. I., Kononenko, A. A. & Safronov, A. L. (2007). Effektivnost razlichnykh pokazatelej ochenki nadezhnosti zheleznodorozhnykh koles [Effectiveness of various indicators for assessing the reliability of railway wheels]. *Metallurgical and mining industry*, 1, 70-74
5. *Derzhavna Instruktsiia z ohliadu, obstezhennia ta formuvannia vahonnykh kolisnykh par. a administratsiia zaliznychnoho transportu Ukrainy "Ukrzaliznytsia"*. (2006). [State Instruction from a glance, quilting and molding of carriage wheel pairs. and the administration of the zaliznych transport of Ukraine "Ukrzaliznytsia"] Kyiv, 40 p
6. Wang, X., Lei, L. & Yu, H. A (2021). Review on Microstructural Features and Mechanical Properties of Wheels/Rails Cladded by Laser Cladding.

*Micromachines*, 12, 152. <https://doi.org/10.3390/mi12020152>

7. Lu, P., Lewis, S.R., Fretwell-Smith, S., Engelberg, D. L., Fletcher, D. I. & Lewis, R. (2019). Laser Cladding of Rail; the Effects of Depositing Material on Lower Rail Grades. *Wear*, 438–439, 203045. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203045>

8. Roy, T., Lai, Q., Abrahams, R., Mutton, P., Paradowska, A., Soodi, M. & Yan, W. (2018). Effect of Deposition Material and Heat Treatment on Wear and Rolling Contact Fatigue of Laser Cladded Rails. *Wear*, 412–413, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.001>

9. Krishna, V., Hossein-Nia, S., Casanueva, C. & Stichel, S. (2020) Long term rail surface damage considering maintenance interventions. *Wear*, 460–461, 203462. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203462>

10. Borja, R., Albi, S.E., Unai, A., Jose, M. M. & Javier, N. (2021). Prediction of Rolling Contact Fatigue Behavior in Rails Using Crack Initiation and Growth Models along with Multibody Simulations. *Appl. Sci.*, 11, 1026. <https://doi.org/10.3390/app11031026>

11. Ekberg, A., Åkesson, B. & Kabo, E. (2014). Wheel/rail rolling contact fatigue—Probe, predict, prevent. *Wear*, 314, 2–12. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.004>

12. Faccoli, M., Zani, N., Ghidini, A. & Petrogalli, C. (2021). Tribological Behavior of Two High Performance Railway Wheel Steels Paired with a Brake Block Cast Iron. *Tribol. Trans.*, 65, 296–307. <https://doi.org/10.1080/10402004.2021.2011997>

13. Miranda, R. S., Rezende, A. B., Fonseca, S. T., Fernandes, F. M., Sinatora, A. & Mei, P. R. (2022). Fatigue and Wear Behavior of Pearlitic and Bainitic Microstructures with the Same Chemical Composition and Hardness Using Twin-Disc Tests. *Wear*, 494–495, 204253. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204253>

14. Zeng, D., Qiao, S., Chen, X., Gong, Y., Jiang, B., Zhao, H., Zhang, J. & Lu, L. (2024). Rolling Contact Fatigue and Wear Behavior of a Vanadium Microalloyed Railway Wheel Steel under Dry Rolling / Sliding Condition. *International Journal of Fatigue*, 182, 108207. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108207>

15. Hu, Y., Watson, M., Maiorino, M., Zhou, L., Wang, W. J., Ding, H. H., Lewis, R., Meli, E., Rindi, A., Liu, Q. Y. & Guo, J. (2021). Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values, *Wear*, 477, 203831. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203831>

16. Girsch, G. & Heyder, R. (2006). Advanced pearlitic and bainitic high strength rails promise to improve rolling contact fatigue resistance. *Proc. 7th World Cong. on 'Railway Research*, 1-9

17. Mazzu, A., Petrogalli, C., Lancini, M., Ghidini, A. & Faccoli, M. (2018). Effect of Wear on Surface Crack Propagation in Rail–Wheel Wet Contact. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 630–639. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3185-1>

18. Farhangdoost, K. & Kavooosi, M. (2010). Effect of Lubricant on Surface Rolling Contact Fatigue Cracks. *Adv. Mat. Res.*, 97–101, 793–796

19. Crawshaw, Ph. (1997) .The Permanent Way Institution, 3, 232 – 239
20. Faccoli, M., Petrogalli, C. & Ghidini, A. (2017). SANDLOS® wheels for desert environments. *The LRS TECHNO*, 10, 1-10
21. Ostash, O. P., Anofriyev, V. G., Andrejko, I. M., Muradyan, L. A. & Kulik, V. V. (2012). Pro kontsepsiuu vyboru stalei dlia vysokomitsnykh zaliznychnykh kolis [About the concept of choosing steels for high-quality sliding wheels] *Physico-chemical mechanics of materials*, 48, 6, 7-13
22. Andersson, R., Ahlstrom, J., Kabo, E., Larsson, F. & Ekberg, A. (2018). Numerical investigation of crack initiation in rails and wheels affected by martensite spots. *Int J Fatigue*, 114, 238–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.05.023>
23. Zhang, S. Y. (2022). Rail rolling contact fatigue formation and evolution with surface defects. *Int J Fatigue*, 158, 106762. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106762>
24. Datsyshyn O. & Hlazov A. (2013). Otsiniuvannia dovhovichnosti til kochennia za utvorenniam typovykh kontaktno-vtomnykh poshkodzen – pitynhu i vidsharuvannia [Evaluation of rolling element durability based on the formation of typical contact fatigue damage – pitting and delamination] *Newsletter of Ternopil National Technical University*, 71, 3, 75-87
25. Uzlov, Y. H., Hasyk, M. Y. & Esaulov, A. T. (1985). Kolesnaia stal [Wheel steel] Kyiv: Technician, 168 p
26. Kozlovskiy, A. I., Shramko, O. V., Danchenko, V. M., Uzlov, I. H., Polskiy, H. M., Horb, Ye. V., Soloviov, S. E., Chupryna, L. V., Hrinkevych, V. O., Babachenko, O. I. & Holubieva, L. V. (2005). Patent No. 74116 Ukraine. Sposib vyrobnytstva sutsilnokatanykh zaliznychnykh kolis [Method for producing sling-rolled skid wheels], Dnipro
27. Uzlov, Y. H., Uzlov, K. Y. & Perkov, O. N. (2004). Vysokoprochnye zhelezodorozhnye koleasa iz mikrolegirovannoj vanadiem stali [High-strength railway wheels made of vanadium microalloyed steel] *Metallurgical and mining industry*, 1, 84-88
28. Msomi, V., Basson, C. C. P. & Mabuwa, S. (2020). Microstructural analysis of rail tracks defects: case study. *Materials Science and Engineering*, 892, 012002
29. Steenbergen, M. (2016). Rolling contact fatigue in relation to rail grinding. *Wear*, 356-357, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.015>
30. Fei, J., Zhou, G., Zhou, J., Zhou, X., Li, Z., Zuo, D. & Wu, R. (2023). Research on the Effect of Pearlite Lamellar Spacing on Rolling Contact Wear Behavior of U75V Rail Steel. *Metals*, 13, 237. <https://doi.org/10.3390/met13020237>
31. Grassie, S. L., Fletcher, D. I., Gallardo Hernandez, E. A. & Summers, P. (2012). Studs: a squat-type defect in rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(3), 243–56. <https://doi.org/10.1177/0954409711421462>
32. Liu, C.-P., Liu, P.-T., Pan, J.-Z., Chen, C.-H. & Ren, R.-M. (2021). Effect of Original Microstructure on Wear Property of ER9 Wheel Steel. *Ironmak. Steelmak*, 48, 133–141. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.174128>

33. Hieu Nguyen, B., Al-Juboori, A., Zhu, H., Zhu, Q., Li, H. & Tieu, K. (2022). Formation Mechanism and Evolution of White Etching Layers on Different Rail Grades. *Int J Fatigue*, 107100. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107100>
34. Al-Juboori, A. (2019). Characterisation of White Etching Layers formed on rails subjected to different traffic conditions. *Wear*, 436–437, 202998. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202998>
35. Steenbergen, M. (2016). Rolling contact fatigue in relation to rail grinding. *Wear*, 356-357, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.015>
36. Fei, J., Zhou, G., Zhou, J., Zhou, X., Li, Z., Zuo, D. & Wu, R. (2023). Research on the Effect of Pearlite Lamellar Spacing on Rolling Contact Wear Behavior of U75V Rail Steel. *Metals*, 13, 237. <https://doi.org/10.3390/met13020237>
37. Steenbergen, M. (2016). Rolling contact fatigue in relation to rail grinding. *Wear*, 356-357, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.015>
38. Grassie, S. L., Fletcher, D. I., Gallardo, Hernandez E. A. & Summers, P. (2012). Studs: a squat-type defect in rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(3), 243–56. <https://doi.org/10.1177/0954409711421462>
39. Rocha, R. C., Ewald, H., Rezende, A. B., Fonseca, S. T. & Mei, P. R. (2023). Using twin disc for applications in the railway: A systematic review. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 45, 191. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04104-1>
40. Fei, J., Zhou, G., Zhou, J., Zhou, X., Li, Z., Zuo, D. & Wu, R. (2023). Research on the Effect of Pearlite Lamellar Spacing on Rolling Contact Wear Behavior of U75V Rail Steel. *Metals*, 13, 237. <https://doi.org/10.3390/met13020237>
41. Rahaman, M. L., Bernal, E., Spiryagin, M., Bosomworth, C., Sneath, B., Wu, Q., Cole, C. & McSweeney, T. (2022). An Investigation into the Effect of Slip Rate on the Traction Coefficient Behaviour with a Laboratory Replication of a Locomotive Wheel Rolling/Sliding along a Railway Track. *Tribol. Int.*, 187, 108773 <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108773>
42. Pan, R, Ren, R, Chen, C. & Zhao, X. (2017). The microstructure analysis of white etching layer on treads of rails. *Eng Fail Anal*, 82, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.018>

**O. I. Babachenko**<sup>1</sup>, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4710-0343

**G. A. Kononenko**<sup>1,2</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

**R. V. Podolskyi**<sup>1</sup>, Ph. D., ORCID 0000-0002-0288-0641

**O. A. Safronova**<sup>1</sup>, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4032-4275

**O. A. Shpak**<sup>1</sup>, Junior Researcher

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

<sup>2</sup> *National Technical University "Dnipro Polytechnic"*

## **RESEARCH ON THE RELATIONSHIP BETWEEN MICROSTRUCTURE AND OPERATIONAL DEFECTS OF WHEELS AND RAILS**



**Abstract.** The safety and economic feasibility of railway transport are largely determined by the reliability and efficiency of the wheel-rail pair. At the same time, the intensity of wear of elements and the rate of development of fatigue defects must be such as to ensure economically feasible operation of rolling stock and tracks. Operational reliability and durability of the wheel-rail pair is ensured by a rational balance of wear and wear resistance. Purpose: to analyze various types of operational defects that occur on the rolling surface of the wheel and rail head and to investigate structural changes in the area of occurrence of these defects. Material and research methods. The work involved an analysis of the microstructure in the working surface area of railway wheels and rails on which defects formed during operation. The studied wheels of grades 2, T were manufactured according to DSTU GOST 10791:2016; ER7, ER8 R8 – according to EN 13262:2020. Railway rails of categories R260Mn, R370Cr and U75 according to EN13674-1:2016. Research results. An analysis of the types of operational defects that occur on the working surface of the wheel rim and rail head was performed. It has been established that defects that form during operation are mainly associated with the accumulation of thermal and mechanical fatigue, wear of the wheel-rail contact surface, plastic deformation, and the appearance of sliders with the formation of martensite in areas subject to intense heat during braking. It is shown that contact fatigue during rolling due to the different distribution of the resulting force for rails, which are mainly subject to traction forces, and for wheels, which are more subject to braking forces, defects can manifest themselves to different degrees. Regarding defects of thermal origin, despite some differences found (different appearance of the burrs and structural differences in the metal in the area adjacent to the areas containing the specified defect), for different types of wheels and rails, the nature of the formation of the specified defect is the same. Wear resistance is primarily determined by the level of strength and hardness in the wheel-rail pair, while the wheel should be less wear-resistant. Conclusion. The initial structural state, chemical composition, level of mechanical properties and their uniformity depend on the production method and can affect the resistance to the formation of operational defects on the working surface of wheels and rails. To ensure rational and effective operation of railway transport, it is necessary to reasonably select a wheel-rail pair, taking into account the purpose of transportation, the level of hardness, the load, the speed of movement, the chemical composition and hardness of the metal of the wheel and rail.

**Keywords:** wear, rolling contact fatigue, hardness, railway wheel, railway rail, crack, microstructure.

**For citation:** Babachenko, O. I., Kononenko, G. A., Podolskyi, R. V., Safronova, O. A., & Shpak, O. A. (2024). Research on the relationship between microstructure and operational defects of wheels and rails. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 517-541. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-517-541>

Стаття надійшла до редакції збірника 06.10.2024 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)