

УДК 621.785:535.211

С. І. Губенко^{1,2}, д.т.н., проф., ORCID 0000-0001-6626-3979

Е. В. Парусов¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4560-2043

І. М. Чуйко¹, к.т.н., ст. досл., ORCID 0000-0002-4753-614X

О. В. Парусов¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9879-6179

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

² Український державний інститут науки і технологій,

ННІ «Придніпровська академія будівництва та архітектури»

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ І ЗНОСОСТІЙКІТЬ КОЛІСНОЇ СТАЛІ

Анотація. За аналізом літературних джерел доказана доцільність локального зміцнення зони викружки поверхні ковзання залізничних коліс шляхом лазерної обробки. На основі дослідження зношених в процесі експлуатації залізничних коліс, що мають різний профіль поверхні ковзання, показано, що протікання інтенсивних пластичних зсувів в умовах дії досить високих контактних напружень під час експлуатації призводить до інтенсивного зносу в зоні викружки, що може призвести до підрізу гребенів. Встановлено, що за лазерної обробки колісної сталі в режимі імпульсного випромінювання виникає лазерно-загартована зона зі структурою дисперсного мартенсита, яка ідентична «білому шару», що утворюється за умов експлуатації на поверхні ковзання. Дослідження показали, що така структура є несприятливою з точки зору експлуатації. Показано, що за лазерної обробки в режимі безперервного випромінювання можна отримати мікрокомполітну бейнітну структуру лазерно-зміцненого шару, яка сприятлива для умов експлуатації. При цьому, параметри зміцненого шару, тонкої структури сталі, а також мікротвердість і твердість можна варіювати у певних межах залежно від вихідного стану колісної сталі, а також режиму безперервного лазерного впливу. На основі порівняльного аналізу показано, що режими лазерної обробки, а також ступінь дисперсності вихідної мікроструктури визначають ефект лазерного зміцнення колісної сталі. Запропоновано перспективний режим з потужністю лазерного променя 600 Вт і швидкістю його переміщення 5–15 мм/с, який рекомендовано використовувати особливо у поєднанні з традиційною термічною обробкою. Рекомендовано також проведення локального лазерного зміцнення зони викружки в умовах виробництва залізничних коліс після гартування перед відпуском для зменшення термічних напружень. Показано, що підвищення зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки свідчить про ефективність застосування зміцнюючої лазерної технології шляхом цілеспрямованого використання

© 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>

внутрішніх резервів структурної пристосованості поверхневих шарів сталі в умовах експлуатації. Обговорені перспективи локальної лазерної обробки викружки з отриманням мікрокомпозитної бейнітної структури в режимі безперервного лазерного випромінювання, що дозволить не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизить ризик підрізу гребенів в процесі експлуатації. Такій обробці можна надавати як нові залізничні колеса після традиційної термічної обробки, так і використовувати її в залізничних депо під час проведення відновлення зношених профілів поверхні ковзання шляхом переточок.

Ключові слова: залізничне колесо, колісна сталь, поверхня ковзання, бейніт, мікрокомпозитна структура, лазерна обробка, зміцнення, зносостійкість

Посилання для цитування: Губенко С. І., Парусов Е. В., Чуйко І. М., Парусов О. В. Вплив лазерної обробки на структуру і зносостійкість колісної сталі. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 566-587. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-566-587>

Вступ. Залізничне колесо служить опорою екіпажу, елементом, що спрямовує при русі, та гальмівним барабаном. Кожен з його елементів (обід, диск, маточина) має свої функції та відчуває властиві йому напруження. При експлуатації колесо знаходиться в складному напруженому стані, який визначається системою контактних, динамічних і циклічних напружень [1]. Динамічні напруження виникають від тиску колеса при його ковзанні по рейці, навантаження при ударах у місцях стиків рейок тощо. Контактні напруження обумовлені взаємодією колеса з рейкою і гальмівними колодками, коли виникають дотичні напруження і напруження від тепла тертя при гальмуванні. Теплові напруження, що діють у ободі і диску, є циклічними. Всі ці напруження викликають в колесі пружно-пластичні і теплові явища, сприяють втомним процесам у ободі і диску, підрізу гребеня та руйнуванню поверхні ковзання. У колесі при експлуатації виникають різного роду ушкодження: знос поверхні ковзання (зміна профілю поверхні ободу по колу ковзання), підріз гребенів, дефекти теплового впливу (повзуни, навари, гальмівні вищербини, термічні тріщини), втомне викришування, тендітні (крихкі) тріщини [2, 3]. В останні роки різко виріс інтерес до вивчення механізму зносу поверхні ковзання, що пов'язане не тільки з необхідністю скорочення пов'язаних із зносом втрат, але також з розробкою ефективних методів підвищення довговічності коліс, забезпеченням надійності їх роботи, особливо в екстремальних умовах (великі навантаження, високі швидкості, підвищені температурні навантаження на затяжних спусках і т. ін.).

Слід зазначити, що були спроби локального зміцнення гребенів коліс за допомогою плазмового впливу з метою боротьби з бічним

зносом, у цих роботах була отримана мартенситна структура зони обробки [4, 5]. Крім того, нагрівання від ТВЧ успішно застосовується в залізничних депо при відновленні зношеного профілю поверхні ковзання коліс рейкового транспорту, результатом такої обробки є отримання дрібно-дисперсної перлітно-феритної структури колісної сталі [6]. Найбільш близьким за своєю сутністю і результатом, що досягається, до технічного рішення, яке є метою даних досліджень, слід вважати спосіб термічного зміцнення поверхні ковзання залізничних коліс за допомогою лазерної обробки [7, 8]. Однією з найважливіших переваг є висока гнучкість лазерної обробки завдяки можливості нагрівання обмежених ділянок поверхні за дуже короткі проміжки часу [9-11]. Збільшення питомої густини енергії призводить до більш значного температурного градієнту, внаслідок якого в тонкому шарі температура поверхні швидко знижується після видалення джерела енергії, що призводить до швидкісного самогартування поверхневого шару [9-11]. Переваги лазерного зміцнення зони викружки: локальність, бездеформаційність, економічність, екологічність, можливість автоматизації. Застосування високих технологій зміцнення дозволить поліпшити властивості колісної сталі та підвищити ресурс роботи залізничних коліс. Слід зазначити, що у ряді науково-дослідних робіт запропоновані методи зміцнення поверхні ковзання та гребенів за допомогою волоконного лазера [12-14], в результаті отримані дисперсні мартенситні структури у зоні лазерного впливу. Мартенситна структура на поверхні ковзання сприяє крихкості ободів і тому вона є неприпустимою [15]. У той же час, в жодній роботі не було запропоновано проводити зміцнювальну локальну лазерну обробку зони викружки з метою отримання бейнітної структури колісної сталі, яка за своїми властивостями є сприятливою для умов експлуатації залізничних коліс.

Мета роботи – вивчення можливості додаткового лазерного зміцнення зони викружки залізничних коліс з метою усунення підрізу гребенів.

Матеріали і методи досліджень. Досліджено зношені колеса різних конструкцій: стандартне колесо з пласкоконічною поверхнею ковзання, що має ухили 1:20 і 1:7 (колесо № 1), а також колесо з комплексно-криволінійною поверхнею ковзання (колесо № 2) [16]. Хімічний склад сталей зношених коліс наведено в табл. 1.

Дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопу «Neophot-31», а також шляхом рентгеноструктурного аналізу. Колеса № 1 і 2 пропрацювали понад 5 років у складі пасажирського потягу. Для лазерної обробки відбирали зразки колісної сталі (колеса № 3 і 4 виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ») з ободу, що зазнав попередню

термічну обробку (температура нагрівання під загартування 860 °С, витримка 20 хв., охолодження у воді зі швидкістю 10 °С/с + відпуск за температури 520 °С з витримкою 2 год.), а також з диску після гарячої деформації в інтервалі температур 1250–850 °С (охолодженого на повітрі від температури 850 °С).

Таблиця 1 – Хімічний склад сталей зношених коліс з різним профілем поверхні ковзання

№ колеса	Вміст елементів, % ваг.									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
1	0,59	0,72	0,34	0,025	0,012	0,14	0,15	0,20	–	–
2	0,57	0,78	0,34	0,023	0,012	0,13	0,16	0,21	0,14	–
3	0,58	0,74	0,34	0,025	0,011	0,14	0,17	0,21	–	–
4	0,58	0,76	0,35	0,030	0,009	0,04	0,05	0,11	0,04	0,05

Лазерне опромінення сталі проводили в режимі імпульсного випромінювання на пристрої «Квант-16» (рис. 1, а), а також в режимі безперервного випромінювання на пристрої ЛГ-701 «Кардамон» (потужність випромінювання 600 Вт, швидкість переміщення лазерного променя – 20, 15, 10 і 5 мм/с) (рис. 1, б). Заміряли твердість і мікротвердість зразків. Випробування на знос зразків колісної сталі після різних режимів лазерного опромінення проводили на випробувальній машині «СМЦ-2» (метод кочення з проковзуванням). Попередньо було виготовлено контртіла, що імітують рейку, частина з яких також піддавалася лазерній обробці за відповідним режимом. Зразки зважували до і після випробувань для визначення втрат в результаті зносу.

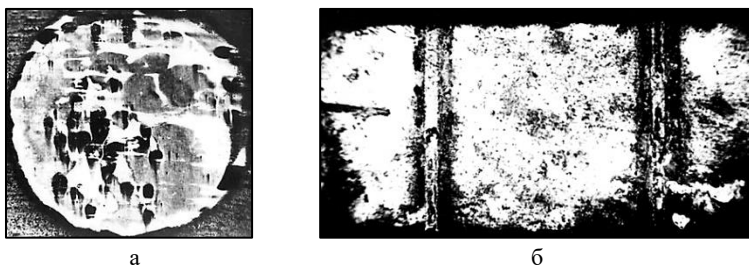


Рисунок 1 – Сліди від імпульсної (а) та безперервної (б) лазерної дії на поверхні зразків колісної сталі: а, б – $\times 10$

Результати досліджень та їх обговорення. При візуальному огляді зношених коліс № 1 і 2, що мають різний профіль поверхні ковзання [16], на цій поверхні виявлені такі дефекти, як повзун, відшарування, наплив металу з поверхні ковзання на зовнішню бічну

грань ободу, втомно-корозійний знос. В результаті напливу відбулося спотворення профілю колеса в процесі експлуатації. У зоні викружки обох коліс спостерігається ділянка локалізованої деформації (рис. 2, а, б), а також мікротріщини (рис. 2, в, г).

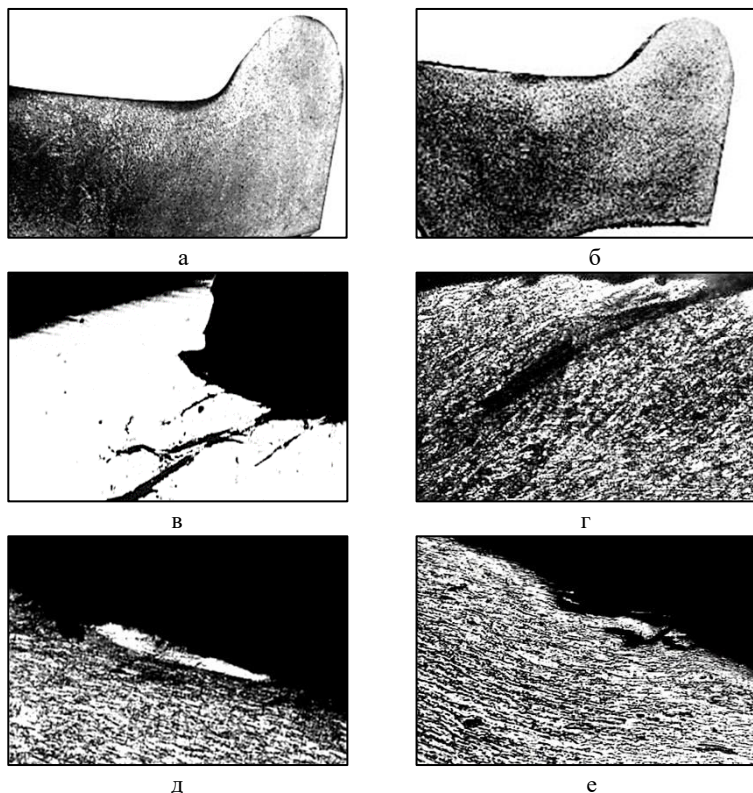


Рисунок 2 – Макроструктура зони викружки колеса № 1 (а) і колеса № 2 (б) із зношеним ободом і мікротріщини у зоні викружки (в, г) та у середині поверхні ковзання (д, е): в-е – $\times 100$

Мікроструктура ободу після загартування від температури 860 °С представляла собою перліт і ферит. Після відпуску в структурі ободу отримали відпущений тонкодисперсний перліт (троостит) і ферит. При відпуску загартованої колісної сталі ставиться завдання підвищити пластичні властивості ободу і знизити залишкові напруження. Після гарячої деформації в інтервалі температур 1250–850 °С і нормалізації диску від температури 850 °С отримали перлітно-феритну структуру колісної сталі, яка відрізняється від структури термічно обробленої

сталі більшими розмірами зерен перліту і фериту та меншим ступенем дисперсності перліту.

У деформованому шарі металу на поверхні ковзання формується дислокаційна коміркова субструктура, що відповідає сильно деформованому стану металу [17-20]. Значення величин ступеня витягнутості зерен, глибини зони пластичних зсувів h_n і щільності дислокацій ρ_L в різних ділянках поверхні ковзання коліс № 1 і 2 наведено в табл. 2. Ступінь витягнутості зерен (ступінь деформації сталі ε) і глибина зони пластичної деформації h_n максимальні в зонах викружки і напливу біля краю ободу. Щільність дислокацій також не однакова в різних місцях поверхні ковзання (див. табл. 2). Дані, які наведено в табл. 2, свідчать про значну локалізацію пластичних зсувів у зоні викружки в процесі експлуатації. Як відомо, ділянки «білого шару» являють собою безструктурний мартенсит – це крихка структурна складова, яка викрошується у процесі роботи колеса (рис. 2, д). З'являється «білий шар» внаслідок нагріву тонкого поверхневого шару від тепла гальмування до температури вище A_{C3} і подальшого різкого охолодження після відключення гальмівних колодок. Ширина «білого шару» $h_{ш}$ залежить від хімічного складу сталі.

Таблиця 2 – Значення параметрів мікроструктури різних ділянок поверхні ковзання коліс з різним профілем поверхні ковзання

№ колеса	Параметр	Місце виміру по ширині ободу		
		викружка	середина	наплив
1	ε , %	65–75	22–25	90
	h_n , мкм	300	60	600
	ρ_L , см ⁻²	$9,22 \cdot 10^{11}$	$3,732 \cdot 10^9$	$9,60 \cdot 10^{11}$
2	ε , %	60	10	80
	h_n , мкм	180	20–40	420
	ρ_L , см ⁻²	$6,54 \cdot 10^{10}$	$6,41 \cdot 10^8$	$8,0 \cdot 10^{11}$
Примітка: ε – ступінь деформації сталі, h_n – глибина зони пластичних зсувів, ρ_L – щільність дислокацій.				

Уздовж усієї поверхні ковзання обох зношених коліс зустрічаються мікротріщини та розшарування, які призводять до формування та відшарування частинок зносу або крихкому руйнуванню, у першу чергу, у зоні викружки (рис. 2, е), що на практиці викликає масові подрізи гребенів коліс.

Результати вивчення характеру неоднорідного розвитку пластичних зсувів поблизу поверхні ковзання, а також механізму зносу залізничних коліс [7, 8, 17-22] показали доцільність додаткового зміцнюючого впливу на зону викружки за допомогою лазерної обробки. У цьому

дослідженні не ставилося завдання отримання рекордно високої твердості на поверхні ковзання, оскільки таке завдання може вирішуватися при розробці режимів зміцнення пари тертя колесо-рейка, а твердість поверхні ковзання залізничного колеса $T_{вкол}$ не повинна бути вищою за твердість поверхні головки рейки $T_{врей}$, а точніше – повинна відповідати співвідношенню $T_{вкол}/T_{врей} = 0,9-1,0$.

Оскільки ободи залізничних коліс піддають термічному зміцненню, необхідне дослідження структурних змін при лазерному впливі на попередньо термічно зміцнену колісну сталь. Крім того, для порівняння доцільно вивчити вплив лазерної обробки на структуру нормалізованої колісної сталі.

Обробка імпульсною лазерною дією. Дослідження структури зони лазерного гартування в режимі імпульсного впливу показало, що на поверхні зразків, як підданих, так і не підданих попередньому термічному зміцненню, з'являється зона безструктурного мартенситу (рис. 3 а, б), для якого характерні значні термічні та структурні напруження, які сприяють зміцненню сталі. Слід зазначити, що в структурі лазерно-загартованого шару присутня деяка кількість надлишкового фериту, що не встиг, очевидно, розчинитися при прискореному нагріванні. Двофазна лазерно-загартована структура спостерігалася при енергії імпульсу 10–13,5 Дж, при більш високих значеннях енергії лазерного імпульсу 15–25 Дж структура лазерно-загартованого шару була однофазною. При тому, рентгеноструктурний аналіз виявив невелику кількість аустеніту залишкового (5–15 %). Для рентгенограм, знятих після лазерного гартування, характерне розмиття мартенситних рентгенівських ліній і фізичне розширення аустенітних ліній у порівнянні зі звичайним гартуванням.

Зміна мікротвердості сталі за глибиною зони лазерного впливу наведена у табл. 3. Чим вище енергія імпульсу, тим більше середнє значення мікротвердості сталі та більше глибина зміцненого шару. За наявності у зміцненому шарі обох сталей неметалевих включень спостерігали зони релаксації термічних напружень (рис. 3, в).

Вплив термічного зміцнення на характер структури лазерного гартування проявляється, вочевидь, внаслідок подрібнення структури сталі як на мікрорівні, так і на рівні тонкої структури, а також підвищення ступеня мікрохімічної неоднорідності, що впливає на механізм і кінетику швидкісного розпаду аустеніту. Це питання потребує додаткових досліджень. У той же час, чим більше енергія лазерного імпульсу, тим більше глибина загартованого шару h , менше об'ємна частка фериту V_{ϕ} і більше залишкового аустеніту в структурі загартованого шару (табл. 4).

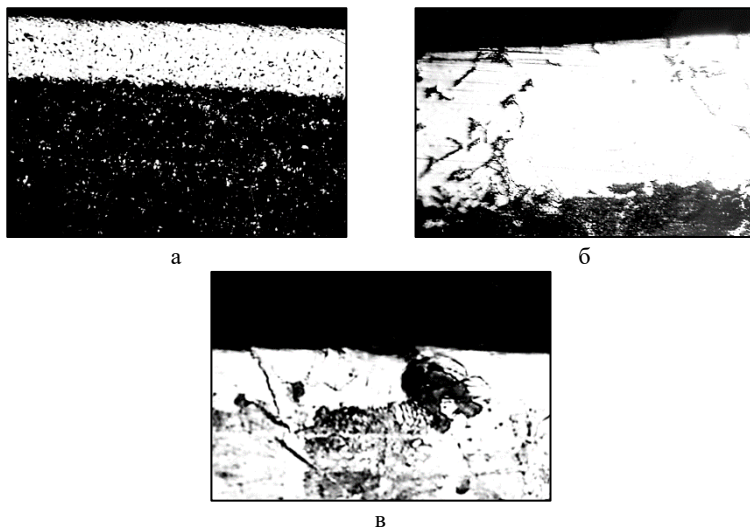


Рисунок 3 – Мікроструктура колісної сталі (×500) після лазерної обробки в імпульсному режимі: а-в – колесо № 3; а – енергія імпульсу 12 Дж; б, в – енергія імпульсу 15 Дж

Таблиця 3 – Мікротвердість за глибиною зони лазерного гартування

Вихідний стан, енергія лазерного імпульсу, Дж	Відстань від поверхні зразка, мкм							
	0	100	200	250	350	420	500	600
Гартування + відпал, 12	<u>4750</u>	<u>4700</u>	<u>2800</u>	<u>2750</u>	<u>2700</u>	<u>2750</u>	<u>2700</u>	<u>2700</u>
	4830	4800	2970	2830	2820	2810	2790	2770
Гартування + відпал, 25	<u>6600</u>	<u>6500</u>	<u>6200</u>	<u>4900</u>	<u>4800</u>	<u>4800</u>	<u>4700</u>	<u>2700</u>
	6780	6720	6360	5040	4970	4930	4830	2830
Гаряча деформація, 12	<u>4040</u>	<u>4000</u>	<u>3000</u>	<u>3000</u>	<u>2900</u>	<u>2900</u>	<u>2900</u>	<u>2900</u>
	4180	4150	3210	3180	3090	3060	3050	3030
Гаряча деформація, 25	<u>4200</u>	<u>4100</u>	<u>4000</u>	<u>4000</u>	<u>4000</u>	<u>3800</u>	<u>3800</u>	<u>3000</u>
	4350	4310	4250	4220	4190	4040	4040	3220

Примітка: значення у чисельнику та знаменнику – колесо № 3 і колесо № 4 відповідно.

Параметри тонкої структури лазерно-загартованої зони після імпульсного впливу наведено у табл. 4. Аналізуючи ці дані, можна стверджувати, що зміцнення колісної сталі при імпульсному лазерному впливі визначається декількома факторами: швидкісне протікання фазових перетворень, локальне легування від неметалевих включень, підвищення щільності дефектів кристалічної будови, розвиток

мікропластичних зсувів. Все це призводить до отримання в гіпернерівноважних умовах ультрадисперсного мартенситу з характерними ознаками сильно зміцненої структури (висока щільність дислокацій, значні мікровикривлення в решітці, дроблення блоків мозаїки).

Таблиця 4 – Вплив енергії лазерного імпульсу на параметри мікро- та тонкої структури колісної сталі, яка була попередньо загартована і відпущена

Характеристика	Вихідн. стан	Енергія лазерного імпульсу W , Дж					
		25	18	15	13,5	12	10
h , мкм	–	300–500	250–420	200–400	80–100	50–80	40–60
H_{μ} , МПа	2700	6600	6220	5480	4900	4620	4420
V_{ϕ} , %	30	5	7	8	30	30	30
$A_{зал}$, %	–	15	12	8	5	5	5
$a \cdot 10^{-5}$, см	3,50	0,35	0,49	0,61	0,92	1,03	1,26
$\Delta a/a$	початок відліку	0,36	0,32	0,32	0,28	0,24	0,24
ρ^{\perp} , см ⁻²	$2,6 \cdot 10^8$	$0,9 \cdot 10^{11}$	$0,2 \cdot 10^{11}$	$0,82 \cdot 10^{10}$	$0,71 \cdot 10^{10}$	$0,53 \cdot 10^{10}$	$0,26 \cdot 10^{10}$
Твердість, НВ	270	670	620	552	495	474	438

Примітка: V_{ϕ} – частка фериту, h – глибина загартованого шару, $A_{зал}$ – кількість залишкового аустеніту, a – розмір блоків, $\Delta a/a$ – мікронапруження ($\Delta a/a$), ρ^{\perp} – щільність дислокацій, H_{μ} – мікротвердість.

Очевидно, що за усіх режимів імпульсного лазерного впливу отримані значення твердості та мікротвердості колісних сталей, які значно перевищують гранично допустимі значення твердості поверхні ковзання, а саме 350 НВ. Структура лазерно-загартованого шару, отриманого при імпульсному лазерному впливі, ідентична «білим шарам», що утворюються на поверхні ковзання під час експлуатації. Такі структури несприятливі з точки зору експлуатаційної надійності [15].

Обробка безперервною лазерною дією. Мікроструктура зони лазерної обробки сталі, попередньо загартованої і відпущеної, являє собою дисперсний мартенсит або бейніт плюс залишковий аустеніт і дисперсний цементит (рис. 4, а, б). Характер основної структури сталі, яка визначається за допомогою рентгеноструктурного аналізу, залежить від швидкості переміщення лазерного променя: за швидкості 20 мм/с, коли інтенсивність охолодження сталі максимальна, отримали мартенсит (за результатом перетворення аустеніт → мартенсит), за інших режимів лазерної обробки – бейніт (за результатом перетворення аустеніт → бейніт), (рис. 4, в-к). Оскільки мартенситна структура на

поверхні ковзання неприпустима [15], представляється перспективною бейнітна структура лазерного гартування.

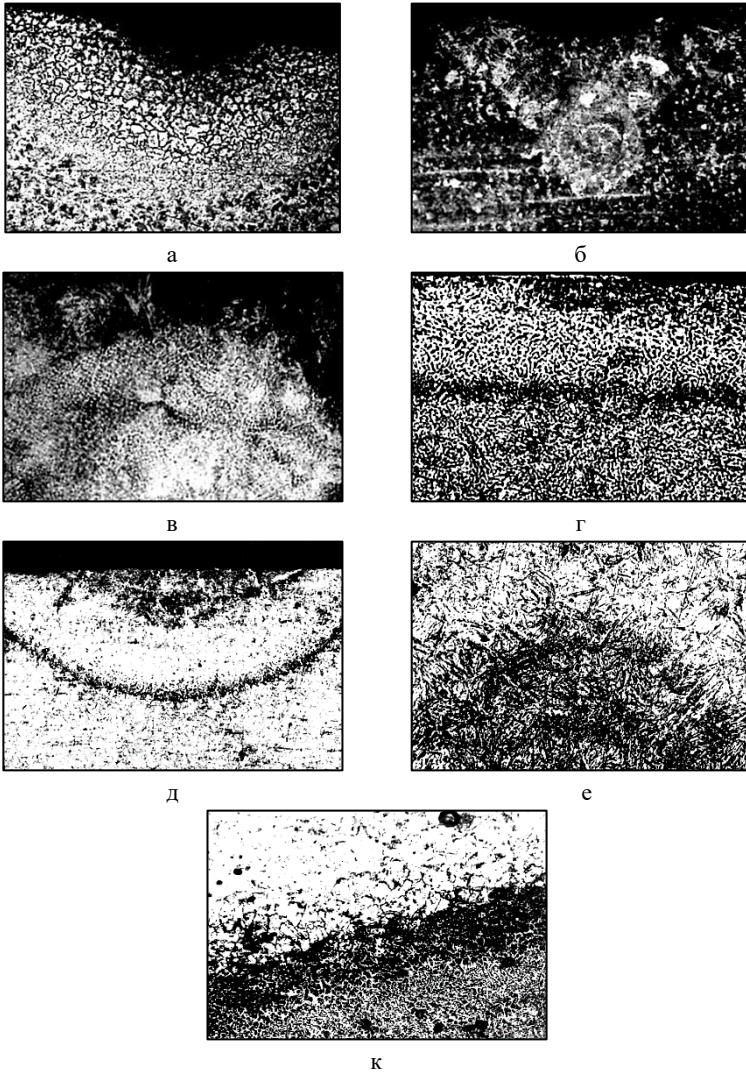


Рисунок 4 – Мікροструктура колісних сталей після лазерної і попередньої термічної обробки: а-в, д – колесо № 3; г, д, к – колесо № 4; а, б, д – $\times 200$; в, г, е, к – $\times 500$

У табл. 5 наведено результати впливу режиму лазерної обробки безперервної дії на параметри тонкої структури колісної сталі. У разі попередньої термічної обробки параметри мікрОВикривлень в решітці, величини блоків і щільності дислокацій свідчать про більшу міру зміцнення сталі при лазерній обробці у порівнянні з вихідним гарячедеформованим і нормалізованим станом, що визначається впливом напружень у вихідній структурі колісної сталі.

Таблиця 5 – Параметри зони лазерного зміцнення колісної сталі після обробки безперервною лазерною дією

Вихідний стан сталі	Швидкість лазерного променя, мм/с	Розмір блоків, $\cdot 10^5$, см	МікрОВикривлення $\Delta a/a$	Щільність дислокацій, ρ^L , см ⁻²
Гаряче-деформований	Почат. відл.	3,52	Початковий відлік	2,3·10 ⁸
	5	0,72	0,35	4,2·10 ¹¹
	10	1,22	0,35	3,48·10 ¹¹
	15	1,71	0,32	2,1·10 ¹⁰
	20	1,82	0,30	1,7·10 ¹⁰
Після термічної обробки	Почат. відл.	3,31	Початковий відлік	4,7·10 ¹⁰
	5	0,48	0,38	6,3·10 ¹¹
	10	0,54	0,37	3,6·10 ¹¹
	15	0,62	0,36	2,4·10 ¹¹
	20	0,69	0,36	2,3·10 ¹¹

Аналіз впливу режиму лазерної обробки, а саме швидкості переміщення лазерного променя, показав, що зі зменшенням часу високоенергетичного впливу знижується рівень зміцнення колісної сталі. Закономірності зміни параметрів тонкої структури сталі після лазерної обробки полягають у тому, що зі збільшенням швидкості переміщення променя блоки мозаїки стають дрібнішими, а мікрОВикривлення в решітці зростають, зростає і щільність дислокацій. Це пов'язано з розвитком часткової релаксації напружень при зменшенні швидкості переміщення лазерного променя.

Аналіз особливостей зони лазерного впливу показав, що її мікроструктура складається з (рис. 5):

- саме ділянки з бейнітною структурою (1), що має ширину S_1 ;
- перехідної зони з бейнітно-перлітною структурою (2), яка має ширину S_2 ;
- зони термічного впливу (3), яка має ширину S_3 в залежності від режиму опромінення (рис. 4, г-к).

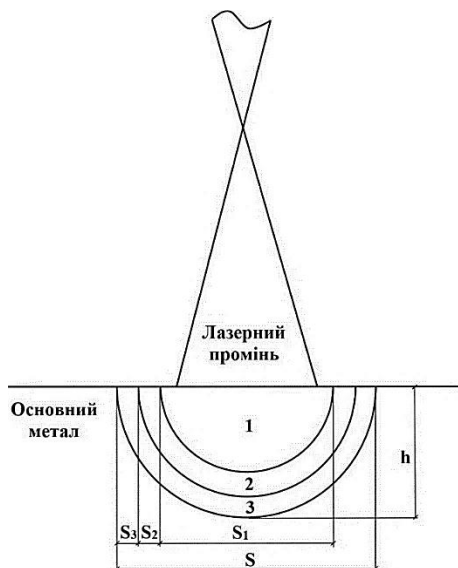


Рисунок 5 – Схема структури зони лазерного зміцнення

В табл. 6 наведено розміри означених структурних зон. Таким чином, в результаті лазерного опромінення отримана мікрокомпонентна (градієнтна) структура зони лазерної обробки. При цьому перехідна зона (2) забезпечує міцне зчеплення шару з бейнітною структурою із основною структурою колісної сталі (зоною термічного впливу), що підвищує стійкість до крихкого руйнування. Загальна ширина S зони лазерного впливу від одного проходу лазерного променя складається:

$$S = S_1 + 2S_2 + 2S_3 \quad (1)$$

Глибина зміцненого шару h складала 1,2–1,6 мм в залежності від режиму опромінення:

$$h = S_1 + S_2 + S_3, \quad (2)$$

причому значення S_2 та S_3 практично є однаковими у напрямках ширини та глибини дії лазерного променя.

Таблиця 6 – Значення ширини градієнтних ділянок зони лазерної дії

Ширина структурної зони	у мм	у мкм
S_1	1,3–1,9	$(1,3–1,9) \cdot 10^3$
S_2	$(30–70) \cdot 10^{-3}$	30–70
S_3	0,3–0,8	$(0,3–0,8) \cdot 10^3$

Мікрокомпозитна зона лазерного впливу, що виникла у результаті бейнітного перетворення аустеніту з різною швидкістю внаслідок неоднорідного розподілу температури за шириною і глибиною дії лазерного опромінення, забезпечує перепади значень мікротвердості сталі у зоні опромінення (табл. 7). Зона лазерного впливу має композитну структуру за ознаками змінних фазового складу та мікротвердості.

Таблиця 7 – Значення мікротвердості ділянок зони лазерного впливу (швидкість руху лазерного променя $V_{np} = 15$ мм/с)

Ділянка у зоні лазерного впливу	Мікротвердість, МПа
1	5680
2	3850
3	3300

Мікротвердість і твердість зміцненого лазерною обробкою шару зі збільшенням швидкості руху лазерного променя зростають, що пов'язано зі збільшенням внутрішніх напружень і щільності дефектів кристалічної будови (табл. 8). Зона термічного впливу після лазерної обробки мікроструктурно виражена слабо. Зі збільшенням швидкості руху променя, тобто зі зменшенням часу лазерного впливу, глибина зміцненої зони зменшується.

Таблиця 8 – Зміна мікротвердості колісної сталі від поверхні в глибину зразка після лазерної обробки

V_{np} , мм/с	Вих. стан сталі	Відстань від поверхні зразка, h , мкм								
		0	100	200	300	400	500	600	700	
5	Після термообробки	4400	4300	4200	3900	3000	3000	2900	2900	
		4580	4470	4320	4070	3200	3180	3080	3070	
15		5500	5300	4400	3100	3100	3000	2900	2900	
		5680	5510	4560	3280	3240	3180	3040	3030	
5		Гаряче-деформований	3800	3800	3500	3100	2400	2300	2300	2300
			3960	3950	3680	3290	2610	2490	2480	2480
15	4600		4400	3400	2500	2400	2300	2300	2300	
	4790		4570	3620	2740	2660	2470	2460	2460	

Примітка: значення у чисельнику та знаменнику – колесо № 3 і колесо № 4 відповідно.

При всіх швидкостях переміщення лазерного променя мікротвердість попередньо термічно обробленої сталі вище, ніж нормалізованої після гарячої деформації (табл. 8).

Таким чином, при безперервному лазерному випромінюванні поверхневий шар колісної сталі зміцнюється у результаті значного диспергування структури, збільшення щільності дефектів кристалічної

будови, дроблення блоків мозаїки і зростання мікрОВикривлень у кристалічній решітці, а також утворення мікрокомполітної структури за результатом бейнітного перетворення. Зміна швидкості руху лазерного променя дозволяє варіювати рівень зміцнення сталі та глибину зміцненої зони, а також характер структури сталі. Оскільки мартенситна структура на поверхні ковзання неприпустима [15], представляється перспективною бейнітна структура лазерного гартування.

Режими лазерної обробки визначають ефект лазерного зміцнення колісної сталі. Перспективним є режим з потужністю лазерного променя 600 Вт і швидкістю його переміщення 5–15 мм/с, особливо у поєднанні з традиційною термічною обробкою. Оскільки в даному дослідженні були отримані значення мікротвердості лазерно-зміцненого шару колісної сталі, підданої попередній термічній обробці, вище 360 НВ і не ставилося завдання отримання рекордних значень цього показника, представляється можливим рекомендувати загальноприйняті заводські режими попередньої традиційної термічної обробки ободів залізничних коліс (температури гартування 840–860 °С і відпуску 480–550 °С відповідно для коліс різних розмірів і сталей різного хімічного складу). Слід зазначити, що при проведенні локального лазерного зміцнення зони викружки в умовах виробництва залізничних коліс доцільним є проведення локального лазерного зміцнення після гартування перед відпуском, тоді відпуск призведе до зменшення термічних напружень.

Вплив лазерної обробки на зносостійкість. Для дослідження зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки проводили випробування на знос. Попередньо були підготовлені контртіла, що імітують рейки, причому частину з них піддавали лазерній обробці за тим же режимом, що і зразок колісної сталі. Результати випробувань наведено в табл. 9.

Аналіз результатів випробувань на знос показав ефективність лазерної обробки колісної сталі в режимі безперервного впливу. За результатами випробувань на знос відношення зносостійкості лазерно-зміцненої сталі та термічно зміцненої колісної сталі виявилось краще у випадках безперервного лазерного впливу, що призводило до отримання бейнітної структури у порівнянні з імпульсним режимом лазерної обробки. Особливо це проявилось у разі поєднання звичайної термічної і лазерної обробки. Зносостійкість зразків колісної сталі підвищилася у середньому на 70 %, зносостійкість контртіла також підвищилася на 10 % у разі рейкової сталі без лазерної обробки і на 62 % у разі рейкової сталі після лазерної обробки. Очевидно, що лазерна обробка в режимі безперервного впливу призводить до суттєвого підвищення зносостійкості колісної сталі (зниженню інтенсивності

зношування), особливо якщо цій обробці піддається пара тертя або один з елементів пари тертя. Це свідчить про перспективність спільної обробки коліс і рейок, у першу чергу в локальних проблемних ділянках. Зокрема, у залізничного колеса – це зона викружки.

Таблиця 9 – Результати випробувань на знос зразків колісної сталі після лазерної обробки

Пара тертя	Початкова маса зразка, г	Маса зразка після випробувань, г	Втрата маси, г	Відношення зносостійкості зміцненого і вихідного матеріалу
Колісна сталь, т/о, без ЛО – рейкова сталь без ЛО	<u>86,87</u> 85,03	<u>85,60</u> 83,83	<u>1,27</u> 1,20	<u>1,0</u> 1,0
Колісна сталь, г/д, імп. ЛО, W = 25 Дж – рейкова сталь без ЛО	<u>83,28</u> 81,22	<u>82,34</u> 80,41	<u>0,94</u> 0,81	<u>1,35</u> 1,48
Колісна сталь, г/д, імп. ЛО, W = 25 Дж – рейкова сталь після ЛО	<u>82,39</u> 81,19	<u>81,51</u> 80,44	<u>0,88</u> 0,75	<u>1,44</u> 1,59
Колісна сталь, г/д, безпер. ЛО, V = 15 мм/с – рейкова сталь без ЛО	<u>81,86</u> 84,11	<u>80,94</u> 83,32	<u>0,92</u> 0,79	<u>1,38</u> 1,51
Колісна сталь, г/д, безпер. ЛО, V=15 мм/с – рейкова сталь після ЛО	<u>81,46</u> 86,33	<u>80,61</u> 85,59	<u>0,85</u> 0,74	<u>1,49</u> 1,62
Колісна сталь, т/о, безпер. ЛО, V = 15 мм/с – рейкова сталь без ЛО	<u>82,03</u> 84,02	<u>81,22</u> 83,31	<u>0,81</u> 0,71	<u>1,56</u> 1,69
Колісна сталь, т/о, безпер. ЛО, V 15 мм/с – рейкова сталь після ЛО	<u>82,22</u> 80,21	<u>81,44</u> 79,52	<u>0,78</u> 0,69	<u>1,62</u> 1,74
Примітка: ЛО – лазерна обробка; г/д – гаряча деформація; т/о – термічна обробка; W – енергія лазерного імпульсу; V _{np} – швидкість переміщення лазерного променя. Значення у чисельнику та знаменнику – колесо № 3 і колесо № 4 відповідно.				

Підвищення зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки показує ефективність застосування зміцнюючої лазерної технології шляхом цілеспрямованого використання внутрішніх резервів структурної пристосованості поверхневих шарів сталі в умовах експлуатації. Вивчення структури тонкого поверхневого шару після випробувань на знос показало пластичну поведінку лазерно-зміцненої структури без утворення тріщин, навіть якщо це були лазерні «білі

шари» на відміну від крихкої поведінки «білих шарів», що виникають під час експлуатації.

Очевидно, що довговічність лазерно-зміцненої поверхні буде забезпечена, якщо надлишкова внутрішня енергія, яка накопичена при лазерному впливі, встигне розсіятися перш, ніж досягне критичного рівня, що викликає руйнування поверхні. Каналами дисипації надлишкової внутрішньої енергії при навантаженні лазерно-опроміненого шару сталі є пластичні зсуви у результаті руху дислокацій і, можливо, утворення бейніту або мартенситу деформації при розпаді залишкового аустеніту.

Під час лазерної обробки з'являється можливість створення мікрокомпонентних структур, які призводять в умовах експлуатації до явища структурно-енергетичної пристосованості, що має знизити знос пари тертя колесо-рейка. Коефіцієнт тертя f при цьому залежить від ряду факторів:

$$f = 2 \cdot \pi(1 - \nu) \cdot \left(\frac{\sigma_T}{G}\right) \cdot \sqrt{\left\{\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right) \cdot \sin\alpha\right\}}, \quad (3)$$

де σ_T – границя текучості сталі, G – модуль зсуву сталі, ν – коефіцієнт Пуасона, ρ і ρ_1 – щільність дислокацій відповідно до і після тертя, $\sin\alpha$ – орієнтаційний фактор.

Очевидно, що для отримання мінімального коефіцієнту тертя для пари колесо-рейка необхідно, щоб лазерно-загартована структура притерпала пластичні перетворення під час експлуатації, що призводить до збільшення щільності дислокацій на робочій поверхні та пластичної релаксації напружень. Це зумовлює необхідність також надавати поверхню рейок локальному лазерному зміцненню.

Таким чином, представляється перспективною локальна лазерна обробка викружки з отриманням бейнітної структури в режимі безперервного лазерного випромінювання, що дозволить не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизить ризик підрізу гребенів у процесі експлуатації.

Висновки

1. Дослідження зношених у процесі експлуатації залізничних коліс, які мають різний профіль поверхні ковзання, показало, що протікання інтенсивних пластичних зсувів в умовах дії досить високих контактних напружень призводить до інтенсивного зносу в зоні викружки, що може призвести до підрізу гребенів. Необхідно локальне зміцнення зони викружки з метою вирішення зазначених проблем.

2. Під час лазерної обробки колісної сталі в режимі імпульсного випромінювання формується лазерно-загартована зона зі структурою

дисперсного мартенситу, яка ідентична «білому шару», що утворюється за умов експлуатації на поверхні ковзання. Така структура є несприятливою з точки зору експлуатаційної надійності.

3. Під час лазерної обробки в режимі безперервного випромінювання утворюється мікрокомпозитна бейнітна структура лазерно-зміцненого шару, яка сприятлива для умов експлуатації. Параметри зміцненого шару, тонкої структури сталі, а також твердість можна варіювати у певних діапазонах залежно від вихідного стану колісної сталі, а також режиму безперервного лазерного впливу.

4. Режимы лазерної обробки, а також ступінь дисперсності вихідної мікроструктури визначають ефект лазерного зміцнення колісної сталі. Перспективним є режим з потужністю лазерного променя 600 Вт і швидкістю його переміщення 5–15 мм/с, особливо у поєднанні з традиційною термічною обробкою. В умовах виробництва залізничних коліс доцільно проведення локального лазерного зміцнення зони викружки після гартування перед відпуском для зменшення термічних напружень.

5. Підвищення зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки показує ефективність застосування зміцнюючої лазерної технології шляхом цілеспрямованого використання внутрішніх резервів структурної пристосованості поверхневих шарів сталі в умовах експлуатації. Представляється перспективною локальна лазерна обробка викружки з отриманням мікрокомпозитної бейнітної структури в режимі безперервного лазерного випромінювання, що дозволить не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизить ризик подрізу гребенів у процесі експлуатації. Такій обробці можна піддавати як нові залізничні колеса після традиційної термічної обробки, так і використовувати її у залізничних депо під час проведення відновлення зношених профілів поверхні ковзання шляхом переточок.

Перелік посилань

1. Sladkovsky A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Y., Gubenko S. An analysis of stress and strain in freight car wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*. 1997. Vol. 16. P. 15–24.

2. Воробьёв А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. Ресурс и ремонтпригодность колёсных пар подвижного состава железных дорог. Москва : ИНФРА-М, 2011. 264 с.

3. Губенко С. И., Беспалько В. Н. К вопросу о качестве лазерного упрочнения сталей. *The World of Science and Innovation* : сб. трудов VII Международной научно-практической конференции, г. Лондон, 10-12 февраля 2021 г, Лондон, Великобритания, 2021. С. 444–452.

4. Петров С. В., Сааков А. Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. Киев : ТОВПС, 2000. 220 с.

5. Сарсембаева Т. Е., Канаев А. Т., Тополянський П. А. Исследования изменения внутренних напряжений в цельнокатаных железнодорожных колесах после поверхностной плазменной закалки. *Strategiczne Pytania Swiatowej Nauki – 2019* : матер. 10 Междунар. научно-практ. конф. Пшемьсль, Польша : Nauka i Studia, 2019. С. 65–73.
6. Кушнер В. С., Кутько А. А., Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А., Керенцев Д. Е. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар. Омск : ОмГТУ, 2015. 224 с.
7. Губенко С. И., Никульченко И. А. О проблеме подреза гребней железнодорожных колес при эксплуатации. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* : зб. праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. С. 365–383.
8. Gubenko S. About the possibility of local laser hardening of the tread of railway wheels. *MTM Machines, Technologies, Materials*. 2021. Vol. 3(5). P. 266–269.
9. Коваленко В. С., Головки Л. Ф., Меркулов Г. В., Стрижак А. И. Упрочнение деталей лучом лазера. Киев : Техника, 1981. 131 с.
10. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. Москва : Мир, 1981. 638 с.
11. Ставрев Д., Щърбаков В., Дикова Ц. Структура и свойства на железо-вуглеродни сплави след въздействие с концентрирани енергийни потоци. Болгария, Варна : СТЕНО, 2015. 264 с.
12. Bogdanov A. V., Grezev N. V., Shmelyov S. A., Murzakov M. A., Markushov Yu. V. Wheel steel strengthening with fiber lasers. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2016. No. 9. P. 30–37. <https://doi.org/10.12737/21237>
13. Козубенко И. Д., Хаскин В. Ю., Черниенко В. Д. Технология лазерной наплавки и термообработки деталей колесных пар подвижного состава. *Автоматическая сварка*. 2001. № 3(576). С. 35–37.
14. Хриптович Е. В., Шиганов И. Н., Пономаренко Д. В., Шмелев С. А., Ишкиняев Э. Д. Сравнительный анализ характеристик бандажей колесных пар, закаленных с использованием лазерного и плазменного источника тепла. *Мир транспорта*. 2022. Вып. 20(3). С. 6–12. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-1>
15. Узлов И. Г., Гасик М. И., Есаулов А. Т., Мирошниченко Н. Г., Пройдак Ю. С. Колесная сталь. Киев : Техніка, 1985. 168 с.
16. Есаулов В. П., Козловский А. И., Есаулов А. Т., Староселецкий М. И. Конструкции железнодорожных колес мира. Днепропетровск : Сич, 1997. 428 с.
17. Краузе Г., Шольген Ю. Факторы, влияющие на трение и износ в системе «колесо-рельс». *Железные дороги мира*. 1978. № 1. С. 62–64.
18. Ларин Т. В. Исследование механизма износа, усталостного выкрашивания, образования выщербин и наволакивания на поверхности катания цельнокатаных колес. *Повышение надёжности и долговечности деталей подвижного состава и пути* : Тр. ВНИИЖТ, 1977. С. 51–68.
19. Таран Ю. Н., Есаулов В. П., Губенко С. И. Повышение износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 2. С. 42–44.

20. Есаулов В. П., Пройдак Ю. С., Губенко С. И., Сладковский А. В., Иськов М. В. Исследование структурных изменений вблизи поверхности катания железнодорожных колес при эксплуатации. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2004. Вып. 5. С. 65–71.

21. Taran Y. N., Esaulov V. P., Gubenko S. I. Increase of wear-resistance of railway wheels with different profile of tread. *Metallurgical and Mining Industry*. 2000. № 2. P. 42–44.

22. Taran Y., Yessaulov V., Kozlovsky A., Sladkovsky A., Gubenko S. Wear reduction on working surface of railway wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*. 1999. Vol. 22. P. 693–701.

References

1. Sladkovsky, A., Yessaulov, V., Shmurygin, N., Taran, Y., & Gubenko, S. (1997). An analysis of stress and strain in freight car wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*, 16, 15-24.

2. Vorob'ev, A. A., Gubenko, S. I., & Ivanov, I. A. (2011). *Resurs i remontoprihodnost kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznykh dorozh* [Resource and maintainability of wheel pairs of rolling stock of railways]. INFRA-M. [In Russian].

3. Gubenko, S. I., & Bepalko, V. N. (2021, 10-12 February). K voprosu o kachestve lazernoho uprochneniia stalei [On the question of the quality of laser hardening of steels]. *The World of Science and Innovation*, London, UK, 444-452. [In Russian].

4. Petrov, S. V., & Saakov, A. G. (2000). *Plasma produktov shoraniia v inzhenerii poverkhnosti* [Plasma of burning products in surface engineering]. TOPS. [In Russian].

5. Sarsembaeva, T. E., Kanaev, A. T., & Topolianskii, P. A. (2019). Issledovaniia izmeneniia vnutrennikh napriazhenii v tsel'nokanykh zheleznodorozhnykh kolesakh posle poverkhnostnoi plazmennoi zakalki [Investigation of internal stress changes in solid rolled railway wheels after surface plasma hardening]. *Strategic Questions of World Science – 2019*, Przemysł, Poland, 65-73. Nauka i Studia. [In Russian].

6. Kushner, V. S., Kutko, A. A., Vorobiev, A. A., Gubenko, S. I., Ivanov, I. A., & Kerentsev, D. E. (2015). *Vliianie struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh stalei na iznashivanie i rezhimy vosstanovleniia profilia kolesnykh par* [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and repair modes of the profile of wheel pairs]. OmGTU. [In Russian].

7. Gubenko, S. I., & Nikulchenko, I. A. (2017). O probleme podreza hrebnei zheleznodorozhnykh koles pri ekspluatatsii [About the problem of undercutting of railway wheel flanges during operation]. *Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow*, Collection of works of the XV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Kyiv, 365-383. NTUU "KPI". [In Russian].

8. Gubenko, S. (2021). About the possibility of local laser hardening of the tread of railway wheels. *MTM Machines, Technologies, Materials*, 3(5), 266-269.

9. Kovalenko, V. S., Golovko, L. F., Merkulov, G. V., & Strizhak, A. I. (1981). *Uprochnenie detalei luchom lazera* [Hardening of parts by a laser beam]. Tekhnika. [In Russian].

10. Redi J. (1981). *Promyshlennyye primeneniia lazerov* [Industrial applications of lasers]. Mir. [In Russian].
11. Stavrev, D., Schrbakov, V., & Dikova, Ts. (2015). Struktura i svoystva zheliazo-vhlerodni splavi sled vzdeystvie s kontsentrirani enerhiini pototsi [Structure and properties of iron-carbon alloys after treatment by concentrated energy flows]. STENO. [In Bulgarian].
12. Bogdanov, A. V., Grezev, N. V., Shmelyov, S. A., Murzakov, M. A., & Markushov, Yu. V. (2016). Wheel steel strengthening with fiber lasers. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, (9), 30-37. <https://doi.org/10.12737/21237>
13. Kozubenko, I. D., Khaskin, V. Yu., & Chernienko, V. D. (2001). Tekhnolohiia lazernoi naplavki i termoobrabotki detalei kolesnykh par podvizhnogo sostava [Technology of laser surfacing and heat treatment of parts of rolling stock wheelsets]. *Automatic Welding*, 3(576), 35-37. [In Russian].
14. Khriptovich, E. V., Shiganov, I. N., Ponomarenko, D. V., Shmelev, S. A., & Ishkiniaev, E. D. (2022). Sravnitel'nyi analiz kharakteristik bandazhei kolesnykh par, zakalennykh s ispol'zovaniem lazernogo i plazmennogo istochnika tepla [Comparative analysis of the characteristics of wheel pairs hardened using laser and plasma heat sources]. *World of Transport*, 20(3), 6-12. [In Russian]. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-1>
15. Uzlov, I. G., Gasik, M. I., Esaulov, A. T., Miroshnichenko, N. G., & Proidak, Yu. S. (1985). *Kolesnaia stal* [Wheel steel]. Tekhnika. [In Russian].
16. Esaulov, V. P., Kozlovskii, A. I., Esaulov, A. T., & Staroseledetskii, M. I. (1997). *Konstruktsii zheleznodorozhnykh koles mira* [Railway wheel designs of the world]. Sich. [In Russian]
17. Krauze, G., & Sholgen Yu. (1978). Faktory, vliyayushchie na trenie i iznos v sisteme "koleso-rels" [Factors affecting friction and wear in the wheel-rail system]. *Zheleznye Dorogi Mira*, (1), 62-64. [In Russian].
18. Larin, T. V. (1977). Issledovanie mekhanizma iznosa, ustalostnogo vykrashivaniia, obrazovaniia vyscherbin i navolakivaniia na poverkhnosti kataniiia tselnokatannykh koles [Study of the mechanism of wear, fatigue spalling, chipping and dragging on the rolling surface of solid-rolled wheels]. *Povyshenie Nadezhnosti i Dolgovechnosti Detalei Podvizhnogo Sostava i Puti* : Trudy VNIIZhT, 51-68. [In Russian].
19. Taran, Yu. N., Esaulov, V. P., & Gubenko, S. I. (2000). Povyshenie iznosostoikosti zheleznodorozhnykh koles s raznym profilem poverkhnosti kataniiia [Improving the wear resistance of railway wheels with different rolling surface profiles]. *Metallurgical and Mining Industry*, (2), 42-44. [In Russian].
20. Esaulov, V. P., Proidak, Yu. S., Gubenko, S. I., Sladkovskii, A. V., & Iskov, M. V. (2004). Issledovanie strukturnykh izmenenii vblizi poverkhnosti kataniiia zheleznodorozhnykh koles pri ekspluatatsii [Study of structural changes near the rolling surface of railway wheels during operation]. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, (5), 65-71. [In Russian].
21. Taran, Y. N., Esaulov, V. P., & Gubenko, S. I. (2000). Increase of wear-resistance of railway wheels with different profile of tread. *Metallurgical and Mining Industry*, (2), 42-44.

22. Taran, Y., Yessaulov, V., Kozlovsky, A., Sladkovsky, A., & Gubenko, S. (1999). Wear reduction on working surface of railway wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*, 22, 693-701.

S. I. Gubenko^{1,2}, Dr. Sc. (Engin.), Prof., ORCID: 0000-0001-6626-3979

E. V. Parusov¹, Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., ORCID: 0000-0002-4560-2043

I. M. Chuiko¹, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., ORCID 0000-0002-4753-614X

O. V. Parusov¹, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., ORCID: 0000-0002-9879-6179

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

² *Ukrainian State University of Science and Technologies,*

ESI "Prydniprovskya Academia of Civil Engineering and Architecture"

THE EFFECT OF LASER PROCESSING ON THE STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF WHEEL STEEL

Abstract. According to the analysis of literary sources, the expediency of local strengthening of the cove zone of the tread by means of laser treatment has been proven. Based on the study of railway wheels worn during operation, which have a different profile of the tread, it is shown that the flow of intense plastic shear under conditions of sufficiently high contact stresses under operating conditions leads to intensive wear in the zone of the cove, which can lead to undercutting of the crests. It has been established that laser treatment of wheel steel in the pulsed radiation mode creates a laser-strengthened zone with a dispersed martensite structure, which is identical to the "white layer" that forms under operating conditions on the tread. Studies have shown that such a structure is unfavorable from the point of view of exploitation. It is shown that during laser processing in the mode of continuous radiation, it is possible to obtain a microcomposite bainite structure of a laser-strengthened layer, which is favorable for operating conditions. At the same time, the parameters of the strengthened layer, fine steel structure, as well as microhardness and hardness can be varied within certain limits depending on the initial state of the wheel steel, as well as the mode of continuous laser exposure. On the basis of a comparative analysis, it is shown that the modes of laser processing, as well as the degree of dispersion of the initial microstructure, determine the effect of laser strengthening of wheel steel. A promising mode with a laser beam power of 600 W and a speed of its movement of 5–15 mm/s is proposed, which is recommended to be used especially in combination with traditional heat treatment. It is also recommended to carry out local laser strengthening of the cove zone in the conditions of the production of railway wheels after quenching before tempering to reduce thermal stresses. It is shown that the increase in the wear resistance of wheel steel after laser treatment indicates the effectiveness of the application of strengthening laser technology through the purposeful use of internal reserves of the structural adaptability of the surface layers of steel in operational conditions. The prospects of local laser processing of the circle with obtaining a microcomposite bainite structure in the mode of continuous laser radiation are discussed, which will not only increase the wear resistance of the tread of railway wheels, but also reduce the risk of undercutting of the crests during

operation. This treatment can be applied both to new railway wheels after traditional heat treatment, and to use it in railway depots during the restoration of worn profiles of the tread by regrinding.

Key words: railway wheel, wheel steel, tread, bainite, microcomposite structure, laser processing, strengthening, wear resistance

For citation: Gubenko, S. I., Parusov, E. V., Chuiko, I. M., & Parusov, O. V. (2024). The effect of laser processing on the structure and wear resistance of wheel steel. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 566-587. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-566-587>

Стаття надійшла до редакції збірника 04.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)