

Парусов Е. В., Губенко С. І., Чуйко І. М., Парусов О. В.

## Розробка методу лазерного зміцнення поверхні ковзання залізничних коліс

Parusov E. V., Gubenko S. I., Chuiko I. M., Parusov O. V.

## Development of a method for laser strengthening of railway wheel tread

**Анотація.** Метою роботи була розробка методу лазерного зміцнення зони викружки залізничних коліс для отримання бейнітної структури і усунення підрізу гребенів. **Методика.** Лазерне опромінення зразків проводили в режимі безперервного випромінювання на пристрої ЛГ-701 «Кардамон» (потужність випромінювання 600 Вт, швидкість переміщення лазерного променя – 20, 15, 10 і 5 мм/с). Вимірювали твердість і мікротвердість зразків. Випробування на зношування зразків колісної сталі після різних режимів лазерного опромінення проводили на випробувальній машині «СМЦ-2» (метод кочення з проковзуванням). Дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопу «Neophot-31», а також шляхом рентгеноструктурного аналізу. **Результати.** За аналізом літературних джерел доказано доцільність локального зміцнення зони викружки поверхні ковзання залізничних коліс шляхом лазерної обробки. На основі дослідження зношеного колеса показано, що протікання інтенсивних пластичних зсувів в умовах дії високих контактних напружень під час експлуатації призводить до інтенсивного зношування в зоні викружки, що може призвести до підрізу гребенів. **Наукова новизна.** Показано, що після 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 у поєднанні з традиційною термічною обробкою. **Практична значущість.** Обговорено перспективи локальної лазерної обробки викружки з отриманням мікрокомполітної 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. 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, мікрокомполітна структура, лазерна обробка, зміцнення, зносостійкість.

**Abstract. Purpose.** The goal of this work was to develop a method for laser strengthening of the cove zone of railway wheels in order to obtain a bainitic structure and eliminate undercutting of the crests. **Methodology.** Laser irradiation of the samples was performed in continuous radiation mode using the LG-701 "Cardamon" device (radiation power: 600 W; laser beam movement speeds: 20, 15, 10, and 5 mm/s). The hardness and microhardness of the samples were measured. Wear tests of the wheel steel samples, after different laser irradiation modes, were conducted on the "SMC-2" testing machine using the rolling with slipping method. The research was carried out using a Neophot-31 optical microscope, as well as X-ray structural analysis. **Findings.** According to the analysis of literary sources, the feasibility of locally strengthening the cove zone of the tread through laser treatment has been demonstrated. Based on a study of railway wheels worn during operation, which exhibit different tread profiles, it has been shown that intense plastic shear flow under high contact stress conditions leads to accelerated wear in the cove zone. This wear can result in the undercutting of the wheel flanges. **Originality.** It has been shown that during laser processing in continuous radiation mode, it is possible to obtain a microcomposite bainitic structure in the laser-strengthened layer, which is favorable under operating conditions. At the same time, the characteristics of the strengthened layer – such as the fine steel structure, microhardness, and hardness – can be varied within certain limits depending on the initial state of the wheel steel and the parameters of the continuous laser exposure. A comparative analysis demonstrates that both the laser processing parameters and the degree of dispersion in the initial microstructure significantly influence the effect of laser strengthening on wheel steel. A promising processing mode, involving a laser beam power of 600 W and a speed of its movement of 5–15 mm/s, is proposed and is recommended for use, particularly in combination with traditional heat treatment. **Practical value.** The prospects of local laser processing of the wheel tread to obtain a microcomposite bainitic structure using continuous laser radiation are discussed. This approach not only increases the wear resistance of railway wheel treads but also reduces the risk of crest undercutting during operation. This treatment can be applied both to new railway wheels after traditional heat treatment and during the restoration of worn tread profiles by regrinding in railway depots.

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



Вступ. Під час експлуатації залізничне колесо знаходиться в складному напруженому стані, який визначається системою контактних, динамічних і циклічних напружень [1]. Всі ці напруження викликають в колесі пружно-пластичні та теплові явища, сприяють втомним процесам у ободі й диску, підрізу гребеня та руйнуванню поверхні ковзання [2–7], де виникають різного роду ушкодження: зношування поверхні ковзання (зміна профілю поверхні ободу за колом ковзання), підріз гребенів, дефекти теплового впливу (повзуни, навари, гальмівні вищербини, термічні тріщини), втомне викришування, крихкі тріщини. В останні роки суттєво зріс інтерес до вивчення механізму зношування поверхні ковзання, що обумовлено не тільки необхідністю скорочення пов'язаних зі зношування втрат, але також із розробкою ефективних методів підвищення довговічності коліс, забезпеченням надійності їх роботи, особливо в екстремальних умовах (великі навантаження, високі швидкості, вплив підвищених температур на затяжних спусках тощо) [2–6].

Слід зазначити, що були спроби локального зміцнення гребенів коліс з метою боротьби з бічним зношуванням за допомогою плазмового впливу [8] та нагрівання струмом високої частоти [9]. Термічне зміцнення поверхні ковзання залізничних коліс за допомогою лазерної обробки також є одним з перспективних напрямів сучасного наукового пошуку [10–12]. Однією з найважливіших переваг лазерної обробки металовиробів є її висока гнучкість завдяки можливості нагрівання обмежених ділянок поверхні за дуже короткі проміжки часу [13–15]. Слід зазначити, що були запропоновані методи зміцнення поверхні ковзання та гребенів за допомогою волоконного лазера [16], у результаті чого формувались дисперсні мартенситні структури у зоні

лазерного впливу, які сприяють крихкості ободів і тому є неприпустимими в колісній сталі. Перспективною слід вважати локальну лазерну обробку зони викружки з метою отримання бейнітної структури колісної сталі, яка за своїми властивостями є сприятливою для умов експлуатації залізничних коліс [7, 17]. Цей метод пов'язаний з використанням безперервної лазерної дії, оскільки за умов імпульсної лазерної обробки структура загартованого шару виявляється ідентичною «білим шарам», що утворюються на поверхні ковзання під час експлуатації [7, 17]. Окремо слід відзначити додаткову позитивну дію лазерної обробки, яка сприяє фрагментації неметалевих включень в лазерно-зміцненому шарі, що діють як концентратори напружень [18], а також суттєвому гальмуванню корозійних процесів і утворення тріщин поблизу неметалевих включень при подальшому навантаженні за час експлуатації. Це пов'язано із взаємодією включень і сталевих матриць, яка призводить до утворення мікрокомполімерних зон і зміні когезивної міцності міжфазних границь включення-матриця [19–22]. Мета роботи – розробка методу лазерного зміцнення зони викружки залізничних коліс для отримання бейнітної структури і усунення підрізу гребенів.

**Матеріали і методи досліджень.** Досліджено зношене колесо № 1, а також колеса № 2 і 3 виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», що зазнали термічну обробку ободу (гартування від 860 °С, відпуск за температури 520 °С з витриманням 2 год.), а також диску після гарячої деформації в інтервалі температур 1250–850 °С (охолодженого на повітрі від температури 850 °С). Хімічний склад сталей досліджуваних коліс наведено у табл. 1.

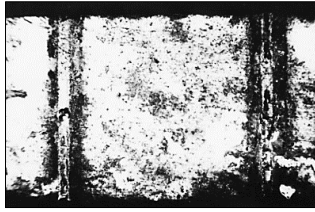
Таблиця 1. Хімічний склад сталей досліджуваних коліс

| № 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        | 0,58                    | 0,74 | 0,34 | 0,025 | 0,011 | 0,14 | 0,17 | 0,21 | –    | –    |
| 3        | 0,58                    | 0,76 | 0,35 | 0,030 | 0,009 | 0,04 | 0,05 | 0,11 | 0,04 | 0,05 |

Дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопу «Neophot-31», а також шляхом рентгеноструктурного аналізу. Лазерне опромінення сталі проводили у 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, а). Вимірювали твердість і мікротвердість зразків. Випробування на зношування 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 піддавалась лазерній обробці за відповідним режимом. Зразки зважували до і після випробувань для визначення втрати ваги у результаті зношування.

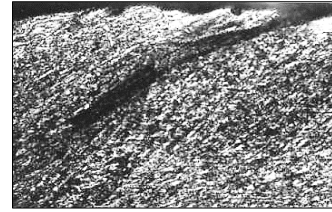
Результати досліджень та їх обговорення. При візуальному огляді зношеного колеса виявлені такі дефекти, як повзун, відшарування, наплив металу з поверхні ковзання на зовнішню бічну грань ободу, втомно-корозійне зношування. У результаті напльви відбулося спотворення профілю колеса в процесі експлуатації (рис. 1, б). У зоні викружки спостерігається ділянка локалізованої деформації, а також мікротріщини (рис. 1, в).



а



б



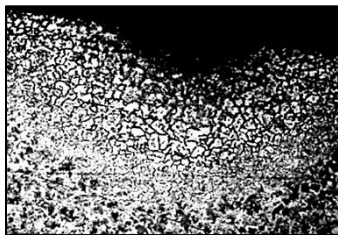
в

Рис. 1. Сліди від безперервної лазерної дії на поверхні зразків колісної сталі (а) та ділянка зношеної поверхні ковзання (б, в): а –  $\times 10$ , в –  $\times 100$

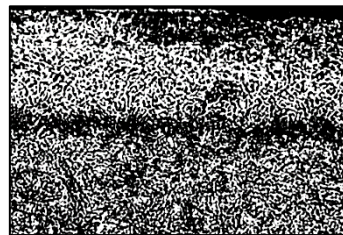
Мікроструктура ободів коліс № 2 і 3 після гартування представляла собою перліт і ферит, після відпуску – відпущений тонкодисперсний перліт (троостит) і ферит. Після гарячої деформації та нормалізації диску отримали перлітно-феритну структуру сталі, яка відрізняється від структури термічно обробленої сталі більшими розмірами зерен перліту і фериту та меншим ступенем дисперсності перліту.

Мікроструктура зони лазерної обробки сталі, яка була попередньо загартована і відпущена у промислових умовах, являє собою дисперсний мартенсит або бейніт, залишковий аустеніт і дисперсний

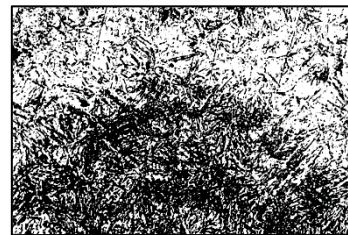
цементит (рис. 2). Характер основної структури сталі, визначеної за допомогою рентгеноструктурного аналізу, залежить від швидкості переміщення лазерного променя: за швидкості 20 мм/с, коли інтенсивність охолодження сталі максимальна, отримали мартенсит (за результатом перетворення аустеніт  $\rightarrow$  мартенсит), за інших режимів лазерної обробки – бейніт (за результатом перетворення аустеніт  $\rightarrow$  бейніт). Оскільки мартенситна структура на поверхні ковзання є неприпустимою, представляється перспективною бейнітна структура лазерного гартування.



а



б



в

Рис. 2. Мікроструктура колісних сталей після лазерної і попередньої термічної обробки: а – колесо № 2; б, в – колесо № 3; а –  $\times 200$ ; б, в –  $\times 500$

У табл. 2 наведено результати впливу режиму лазерної обробки безперервної дії на параметри тонкої структури колісної сталі. У разі попередньої термічної обробки параметри мікротвердості у решітці, величини блоків і щільності дислокацій свідчать про більшу міру зміцнення сталі під час лазерної обробки у порівнянні з вихідним гарячедеформованим і нормалізованим станом, що визначається впливом напружень у вихідній структурі колісної сталі.

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 мікротвердості в решітці зростають, зростає і щільність дислокацій. Це пов'язано з розвитком часткової релаксації напружень за умови зменшення швидкості переміщення лазерного променя.

Аналіз особливостей зони лазерного впливу показав, що її мікроструктура складається з (рис. 3):

- 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. 2, б, в).

У табл. 3 наведено розміри означених структурних зон. Таким чином, у результаті лазерного опромінення отримана мікрокомполітна (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 зони лазерного впливу від одного проходу лазерного променя ( $S$ ) 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 2. Параметри тонкої структури зони лазерного зміцнення колісної сталі після обробки безперервною лазерною дією

| Вихідний стан сталі     | Швидкість руху лазерного променя, мм/с | Розмір блоків, $\cdot 10^5$ , см | Мікровикривлення $\Delta a/a$ | Щільність дислокацій, $\rho$ , $\text{см}^{-2}$ |
|-------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| Гаряче-деформований     | Початковий відлік                      | 3,52                             | Початковий відлік             | $2,3 \cdot 10^8$                                |
|                         | 5                                      | 0,72                             | 0,35                          | $4,2 \cdot 10^{11}$                             |
|                         | 10                                     | 1,22                             | 0,35                          | $3,48 \cdot 10^{11}$                            |
|                         | 15                                     | 1,71                             | 0,32                          | $2,1 \cdot 10^{10}$                             |
|                         | 20                                     | 1,82                             | 0,30                          | $1,7 \cdot 10^{10}$                             |
| Після термічної обробки | Початковий відлік                      | 3,31                             | Початковий відлік             | $4,7 \cdot 10^{10}$                             |
|                         | 5                                      | 0,48                             | 0,38                          | $6,3 \cdot 10^{11}$                             |
|                         | 10                                     | 0,54                             | 0,37                          | $3,6 \cdot 10^{11}$                             |
|                         | 15                                     | 0,62                             | 0,36                          | $2,4 \cdot 10^{11}$                             |
|                         | 20                                     | 0,69                             | 0,36                          | $2,3 \cdot 10^{11}$                             |

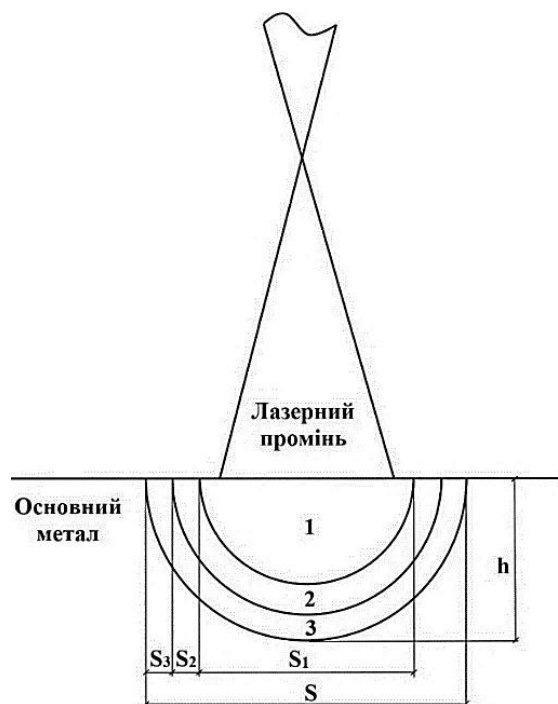


Рис. 3. Схема структури зони лазерного зміцнення

Таблиця 3. Ширина градієнтних ділянок зони лазерного впливу

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

Мікрокомполітна 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. 4). Зона лазерного впливу має композитну структуру за ознаками змінних фазового складу та мікротвердості.

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. 5). Зона термічного впливу після лазерної обробки мікроструктурно виражена слабо. Зі збільшенням швидкості руху променя, тобто зі зменшенням часу лазерного впливу, глибина зміцненої зони зменшується. За всіх швидкостей переміщення лазерного променя мікротвердість попередньо термічно обробленої сталі є вищою у порівнянні з нормалізованим станом після гарячої деформації (табл. 5).

Таблиця 4. Показники мікротвердості ділянок зони лазерного впливу (швидкість руху лазерного променя  $V_{пр} = 15$  мм/с)

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

Таблиця 5. Зміна мікротвердості колісної сталі від поверхні у глибину зразка після лазерної обробки

| Таблиця 6. Зміни мікротвердості копієвої сталі від поверхні у напрямку зразка після напівної обробки |                     |                                   |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| V <sub>пр</sub> ,<br>мм/с                                                                            | Вихідний стан сталі | Відстань від поверхні зразка, 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 – коесо № 2 і коесо № 3 відповідно.                    |                     |                                   |      |      |      |      |      |      |      |

Примітка: значення у чисельнику та знаменнику – колесо № 2 і колесо № 3 відповідно.

Таким чином, при безперервному лазерному випромінюванні поверхневий шар колісної сталі зміцнюється у результаті значного диспергування структури, збільшення щільності дефектів кристалічної будови, дроблення блоків мозаїки та зростання мікрвикривлень у кристалічній решітці, а також утворення мікрокомпозитної 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 наявність мартенситної структури на поверхні ковзання є неприпустимою, представляється перспективною бейнітна структура лазерного гартування.

Режими лазерної обробки визначають ефект лазерного зміцнення колісної сталі. Перспективним слід вважати режим з потужністю лазерного променя 600 Вт і швидкістю його переміщення 5–15 мм/с, особливо у поєднанні з традиційною термічною обробкою залізничних коліс. Оскільки у цьому дослідженні були отримані значення мікротвердості лазерно-зміцненого шару колісної сталі, підданої попередній термічній обробці, вищі за 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 °C і відпуску 480–550 °C відповідно для коліс різних розмірів і сталей різного хімічного складу). Слід зазначити, що під час локального лазерного зміцнення зони викружки в умовах виробництва залізничних коліс доцільним є проведення цієї операції після гартування перед відпуском. У такому разі відпуск призведе до зменшення термічних напружень.

Для дослідження зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки проводили випробування на

зношування. Результати випробувань наведено у табл. 6. Аналіз результатів випробувань показав ефективність лазерної обробки колісної сталі у режимі безперервного впливу з отриманням бейнітної структури лазерно-зміцненого шару. Особливо це проявилось у разі поєднання звичайної термічної і лазерної обробок. 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.

Підвищення зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки підтверджує ефективність застосування зміцнювальної лазерної технології за рахунок цілеспрямованого використання внутрішніх резервів структурної пристосованості поверхневих шарів сталі в умовах експлуатації. Вивчення структури тонкого поверхневого шару після випробувань на зношування показало пластичну поведінку лазерно-зміцненої структури без утворення тріщин.

Очевидно, що для отримання мінімального коефіцієнту тертя для пари колесо-рейка необхідно, щоб у лазерно-загартованій структурі сталі під час експлуатації реалізовувалися пластичні перетворення, що призводить до збільшення щільності дислокацій на робочій поверхні та пластичної релаксації напружень. Це зумовлює доцільність додаткового локального лазерного зміцнення робочої поверхні залізничних рейок.

Таблиця 6. Результати випробувань на зношування зразків колісної сталі після лазерної обробки

| Пара тертя                                                                                                                                                                                                     | Початкова вага зразка, г | Вага зразка після випробувань, г | Втрата ваги, г | Відношення зносостійкості зміцненого і вихідного матеріалу |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------|
| Колісна сталь, т/о, без ЛО – рейкова сталь без ЛО                                                                                                                                                              | 86,87<br>85,03           | 85,60<br>83,83                   | 1,27<br>1,20   | 1,0<br>1,0                                                 |
| Колісна сталь, г/д, ЛО, $V_{пр} = 15$ мм/с – рейкова сталь без ЛО                                                                                                                                              | 81,86<br>84,11           | 80,94<br>83,32                   | 0,92<br>0,79   | 1,38<br>1,51                                               |
| Колісна сталь, г/д, ЛО, $V_{пр} = 15$ мм/с – рейкова сталь після ЛО                                                                                                                                            | 81,46<br>86,33           | 80,61<br>85,59                   | 0,85<br>0,74   | 1,49<br>1,62                                               |
| Колісна сталь, т/о, ЛО, $V_{пр} = 15$ мм/с – рейкова сталь без ЛО                                                                                                                                              | 82,03<br>84,02           | 81,22<br>83,31                   | 0,81<br>0,71   | 1,56<br>1,69                                               |
| Колісна сталь, т/о, ЛО, $V_{пр} = 15$ мм/с – рейкова сталь після ЛО                                                                                                                                            | 82,22<br>80,21           | 81,44<br>79,52                   | 0,78<br>0,69   | 1,62<br>1,74                                               |
| Примітка: ЛО – лазерна обробка; г/д – гаряча деформація; т/о – термічна обробка; $V_{пр}$ – швидкість переміщення лазерного променя. Значення у чисельнику та знаменнику – колесо № 2 і колесо № 3 відповідно. |                          |                                  |                |                                                            |

### Висновки

1. Дослідження зношених у процесі експлуатації залізничних коліс показало, що протікання інтенсивних пластичних зсувів в умовах дії досить високих контактних напружень призводить до інтенсивного зношування в зоні викружки, що може призвести до підрізу гребенів. При цьому доцільним є локальне зміцнення зони викружки з метою вирішення зазначених проблем.

2. Під час лазерної обробки в режимі безперервного випромінювання утворюється мікрокомполітна 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.

3. 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.

4. Підвищення зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки показує ефективність застосування зміцнювальної лазерної технології шляхом цілеспрямованого використання внутрішніх резервів структурної пристосованості поверхневих шарів сталі в умовах експлуатації. Представляється перспективною локальна лазерна обробка викружки, що дозволить не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизити ризик підрізу гребенів у процесі експлуатації. Такий 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.

### Бібліографічний опис

- 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.
- Xie Q., Gong-Quan T., Peng W., Li W., Ze-Feng W. Wheel wear evolution characteristics of alpine high-speed EMU and analysis of its influence. *Engineering Mechanics*. 2019. Vol. 36(10). P. 229–237. <http://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.11.0590>
- Freisinger M., Rojacz H., Pichelbauer K., Trausmuth A. Comparative study on the influence of initial deformation and temperature of thermally induced white etching layers on rail wheels. *Tribology International*. 2023. Vol. 177. 107990 <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107990>
- He C., Zou G., Gan Y., Ye R., Zhai Y., Liu J. Analysing the rolling contact damage behavior of a high-speed wheel tread – A case study. *Wear*. 2023. Vol. 522. 204677. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204677>
- He C. G., Guo J., Liu Q. Y., Wang Q. Y. Experimental investigation on the effect of operating speeds on wear and rolling contact fatigue damage of wheel materials. *Wear*. 2016. Vol. 364–365. P. 257–269. <http://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.08.006>
- Sciammarella C. A., Chen R. J. S., Gallo P., Berto F., Lamberti L. Experimental evaluation of rolling contact fatigue in railroad wheels. *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 91. Part 1. P. 158–170. <http://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.035>
- Bogdanov A. F., Gubenko S. I., Zhukov D. A., Ivanov I. A. Surface layer and performance properties of solid wheel rim. *Transport and Engineering. Railway Transport*. Scientific Proceedings of Riga Technical University. 2008. № 30. P. 56–61.
- Сарсембаева Т. Е., Канаев А. Т., Тополянский 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.
- 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.

9. 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.
10. 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. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/5/181>
11. Patil M., Acherjee B., Manna I. Enhancing wear resistance of railway wheel by laser surface cladding of martensitic stainless steel on high carbon rail steel. *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 42. 111353. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111353>
12. Коваленко В. С., Головкин Л. Ф., Меркулов Г. В., Стрижак А. И. Упрочнение деталей лучом лазера. Киев : Техника, 1981. 131 с.
13. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. Москва : Мир, 1981. 638 с.
14. Ставрев Д., Щербakov В., Дикова Ц. Структура и свойства на железо-углеродни сплави след въздействие с концентрирани енергийни потоци. Болгария, Варна : СТЕНО, 2015. 264 с.
15. 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>
16. Губенко С. И., Парусов Е. В., Чуйко И. 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>
17. Gubenko S. I., Nikul'chenko I. A. Fragmentation of nonmetallic inclusions during local remelting upon laser steel processing. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. No. 3. P. 203–208. <https://doi.org/10.3103/S0967091220030043>
18. Gubenko S. I. Effect of laser surface treatment on the initiation of corrosion defects near nonmetallic inclusions. *Materials Science*. 2022. Vol. 58. No. 3. P. 313–317. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00665-7>
19. Hubenko S. Influence of laser treatment on the strength of “inclusion – steel matrix” interfaces under plastic deformation. *Materials Science*. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 36–41. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0040-8>
20. Губенко С. Трансформация включений при лазерной обработке сталей. Том 1. Локальное упрочнение. London–UK, Republic of Moldova – EU – Indian : LAP LAMBERT academic publishing, 2023. 317 с.
21. Губенко С. Трансформация включений при лазерной обработке сталей. Том 2. Образование дефектов. London–UK, Republic of Moldova – EU – Indian : LAP LAMBERT academic publishing, 2024. 505 с.

### 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. Xie, Q., Gong-Quan, T., Peng, W., Li, W., Ze-Feng, W. (2019). Wheel wear evolution characteristics of alpine high-speed EMU and analysis of its influence. *Engineering Mechanics*, 36(10), 229-237. <http://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.11.0590>
3. Freisinger, M., Rojacz, H., Pichelbauer, K., Trausmuth A. 2023. Comparative study on the influence of initial deformation and temperature of thermally induced white etching layers on rail wheels. *Tribology International*, 177, 107990. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107990>
4. He, C., Zou, G., Gan, Y., Ye, R., Zhai, Y., Liu, J. (2023). Analysing the rolling contact damage behavior of a high-speed wheel tread – A case study. *Wear*, 522, 204677. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204677>
5. He, C. G., Guo, J., Liu, Q. Y., Wang, Q. Y. (2016). Experimental investigation on the effect of operating speeds on wear and rolling contact fatigue damage of wheel materials. *Wear*, 364-365, 257-269.
6. Sciammarella, C. A., Chen, R. J. S., Gallo, P., Berto, F., Lambert, L. (2016). Experimental evaluation of rolling contact fatigue in railroad wheels. *International Journal of Fatigue*, 91(1), 158-170. <http://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.035>
7. Bogdanov, A. F., Gubenko S. I., Zhukov D. A., Ivanov I. A. Surface layer and performance properties of solid wheel rim. *Transport and Engineering. Railway Transport*. Scientific Proceedings of Riga Technical University. 2008. № 30. P. 56–61.
8. Sarsembaeva T. E., Kanaev, A. T., Topolianskii, P. A. (2019). Issledovaniia izmeneniia vnutrennikh napriazhenii v tsel'noykh zheleznodorozhnykh kolesakh posle poverkhnostnoi plazmennoi zakalki. *Strategic Questions of World Science*, 65-73.
9. Kushner, V. S., Kutko, A. A., Vorobiev, A. A., Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kerentsev D. E. (2015). *Vlianie struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivanie i rezhimy vosstanovleniia profilia kolesnykh par*. OmGTU.
10. Gubenko, S. I., Nikulchenko, I. A. (2017). XV All-Ukrainian scientific and practical conference “Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow”. Kyiv : NTUU “KPI”, P. 365-383.
11. Gubenko, S. (2021). About the possibility of local laser hardening of the tread of railway wheels. *MTM Machines, Technologies, Materials*, 3(5), 266-269. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/5/181>
12. Patil, M., Acherjee, B., Manna, I. (2024). Enhancing wear resistance of railway wheel by laser surface cladding of martensitic stainless steel on high carbon rail steel. *Materials Today Communications*, 42, 111353. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111353>
13. Kovalenko, V. S., Golovko, L. F., Merkulov, G. V., Strizhak, A. I. (1981). *Uprochnenie detalei luchom lazera*. Tekhnika.
14. Redi, Dzh. (1981). *Promyshlennyye primeneniya lazerov*. Mir,
15. Stavrev, D., Schrbakov, V., Dikova, Ts. (2015). *Struktura i svoistva zheliazo-vhlerodni splavi sled vzdeistvie s kontsentrirani energiini pototsi*. STENO.
16. 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>
17. Gubenko, S. I., Parusov, E. V., Chuiko, I. M., Parusov, O. V. (2024). Vplyv lazernoi obrobky na strukturu i znosoztiikist kolisnoi stali. *Fundamentalni i prykladni problemy chornoj metalurhii*, 38, 566-587.
18. Gubenko, S. I., Nikulchenko, I. A. (2020). *Steel in Translation*, 50(3), 203-208. <https://doi.org/10.3103/S0967091220030043>

19. Gubenko, S. I. (2022). Effect of laser surface treatment on the initiation of corrosion defects near nonmetallic inclusions. *Materials Science*, 58(3), 313-317. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00665-7>.
20. Hubenko, S. (2017). Influence of laser treatment on the strength of "inclusion – steel matrix" interfaces under plastic deformation. *Materials Science*, 53(1), 36-41. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0040-8>.
21. Gubenko, S. (2023). Transformatsiia vklucheni pri lazernoi obrabotke stalei. Tom 1. Lokalne uprochnenie. London – UK, Republic of Moldova – EU – Indian : LAP LAMBERT academic publishing, 317 p.
22. Gubenko, S. (2024). Transformatsiia vklucheni pri lazernoi obrabotke stalei. Tom 2. Obrazovanie defektov. London – UK, Republic of Moldova – EU – Indian : LAP LAMBERT academic publishing, 505 p.

*Надіслано до редакції / Received: 15.05.2025*

*Прийнято до друку / Accepted: 30.08.2025*