

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.7

УДК 620.178.12:629.3.027.74

В.В. Перемітько, д.т.н., професор, vperemitko1965@gmail.com

М.А. Лі, аспірант

Д.С. Кривенцов, аспірант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ЗМІНИ В РОЗПОДІЛІ ТВЕРДОСТІ ТА МІКРОТВЕРДОСТІ ЗА ПЕРЕРІЗОМ ДЕТАЛЕЙ ГУСЕНИЧНОГО РУШІЯ В РЕЗУЛЬТАТІ ЇХ ЗНОСУ

Наводяться результати вимірювання твердості у перерізі ланок та мікротвердості у перерізі опорних котків бульдозерів. Визначено зміни у показниках механічних характеристик після зносу зазначених деталей до стану заміни. На підставі порівняння епюр зафіксовано вирівнювання твердості по поверхні тертя та підвищення значень твердості до гартувальних величин. Причиною цього названо фрикційно-деформаційне зміцнення матеріалу бокових поверхонь ланок. Під час роботи контактної пари, внаслідок багаторазового зміцнення-зміцнення, в опорних котках формується прошарок зі стабілізованою мікротвердістю. Запропоновано отримані результати використовувати при розробці технології відновлення деталей.

Ключові слова: ланка; опорний коток; гусеничний рушій; знос; зміни твердості та мікротвердості; причини

The results of measuring the hardness in the cross section of the links and the microhardness in the cross section of the support rollers of bulldozers are given. Changes in the indicators of mechanical characteristics after wear of these parts until the replacement are determined. Based on the comparison of the diagrams, the alignment of the hardness on the friction surface and the increase of the hardness values to the quenching values are recorded. The friction-deformation hardening of the material of the side surfaces of the links is the reason. During the operation of the contact pair, a sub-layer with stabilized microhardness is formed in the support rollers because of the repeated hardening-softening. It is offered to use the received results at development of technology of details restoration.

Keywords: link; support roller; continuous track; wear; changes in hardness and microhardness; reasons

Постановка проблеми

Збільшення ресурсу деталей машин, що утворюють контактні пари та піддаються під час експлуатації зносу, полягає, передусім, у початковому та відновному зміцненні робочих поверхонь. Спосіб та технологія реновації залежать від суттєвості змін вихідної геометрії. У разі зменшення початкових лінійних розмірів на 0,5 мм та більше перевагу віддають зварювальним процесам, зокрема дуговому наплавленню [1—3].

Підбір матеріалу, який при цьому застосовується, проводять, виходячи з вимог до робочого шару (його твердості, хімічного та фазового складу, зносостійкості). Слід також мати на увазі, що працездатність системи основа – нанесений шар суттєво залежить від градієнту механічних характеристик за глибиною у приповерхневих областях контактуючих деталей. Якщо передбачається значна відмінність у твердості, мікротвердості матеріалів основи та зовнішнього робочого шару, доцільним стає нанесення між ними проміжного шару. По цій причині у початкових даних до проектування технології зазначають твердість основи матеріалу деталі та вимоги до матеріалу шару, який слід наносити при відновленні або зміцненні [4—6]. При цьому, зазвичай, беруться до уваги початкові механічні характеристики нової деталі, без урахування змін, що відбуваються з матеріалом впродовж експлуатації, яка супроводжується не лише фізичним руйнуванням та видаленням певних об'ємів металу, але й тривалим термічним впливом [7]. Нехтування зазначеного факту під час розробки технології реновації може суттєво зни-

зити її ефективність. Крім того, значення твердості та мікротвердості, які в значній мірі визначають опірність руйнуванню поверхневих шарів, важливо знати для адекватної оцінки процесів, що супроводжують зношування деталей, та прогнозування його інтенсивності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомо, що під дією сил тертя, а також динамічних чинників (ударні навантаження, вібрації тощо) і природних процесів (старіння матеріалів, контактування з агресивними реагентами та ін.) відбуваються структурні та фізико-хімічні зміни в матеріалі деталі. Як наслідок, виникають напруження у поверхневому шарі, які спричиняють утворення мікротріщин. Кристалічна решітка може ущільнюватися та призводити до наклепу контактного шару [8].

Повідомляється про результати експериментального виявлення змін у структурі та властивостях матеріалу приповерхневих шарів, що сталися внаслідок тривалої експлуатації деталей, що мають тертьові сполучення.

Так, зокрема, встановлено закономірності зміни твердості зубчастої шестерні у складі гірничої машини, які зумовлені зміною міцнісних властивостей металу. Останню автори пов'язують з мікро- і макромеханізмами пластичної та пружної деформації, спотворенням кристалічної решітки металу, з утворенням і переміщенням вакансій та дислокацій [9]. Порівняння розмірів і значень твердості зразка дозволило зробити висновок, що більша деформація відповідає більшому зростанню твердості. Встановлено, що виявлені зміни локальної твердості відбуваються в зонах напружень, що перевищують межу пропорційності, а робота сил руйнування пов'язується з щільністю дислокацій, прилеглих до площини руйнування, та виражається через приріст твердості.

Повідомляється також про дослідження дислокаційної структури поверхневих шарів мідних і сталевих зразків після випробувань на тертя ковзання протягом різної тривалості часу. Результати просвічуючої електронної мікроскопії та рентгенівських досліджень показали, що кожен матеріал характеризується власним певним станом структури поверхневого шару, який відповідає умовам тертя, таким як навантаження, матеріали контртіла та ін. Сутність мікроструктурних змін при збільшенні часу випробування полягає у збільшенні щільності дислокацій, утворенні дислокаційних скупчень і фрагментованої структури. Встановлено, що за постійних умов тертя характеристики мікроструктури змінюються лише в період припрацювання. Кінетика утворення мікроструктури в поверхневих шарах при терті зумовлює процеси зміцнення та зношування матеріал [10].

Формулювання мети дослідження

Беручи до уваги наведені факти, витікає, що при відновленні кожної конкретної деталі після її зносу слід брати до уваги конкретні зміни, що відбулися у поверхневому шарі контактної поверхні. Метою дослідження ставилося експериментальне визначення твердості та мікротвердості матеріалу поверхневого шару в зонах найбільшої зміни початкової геометрії ланок та котків гусеничного рушія як поширених об'єктів у практиці відновного наплавлення для врахування отриманих значень при розробці технології їх реновації.

Виклад основного матеріалу

Дослідження виконували з використанням нових та зношених (термін експлуатації – 2000 год.) ланок та котків гусеничного рушія бульдозерів на базі тракторів Т-100М та Т-130. Бракувальне зношення деталей складало 3...4 мм. Матеріалом опірних котків є сталь 40Г із твердістю виробів HRC 20, а ланок — сталь 45, якій відповідає твердість HRC 21. Заміри твердості за перерізом ланок проводили твердоміром ТК-2, а статичної мікротвердості — за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 0,5 Н. Мікротвердість вимірювали за нормаллю до поверхні тертя на глибину до 2 мм на вирізаних темплетях.

На рис.1 представлені епюри розподілу твердості у характерних зонах поперечного перерізу нових ланок. Необхідно відмітити, що твердість за глибиною у середині перерізу (рис.1, а) характеризується рівномірним розподілом при середньому значенні HRC 22, за виключенням приповерхневих шарів глибиною 15...17 мм, де спостерігається підвищення твердості до HRC 33...35. На робочій поверхні (рис.1, б) розподіл твердості також нерівномірний: гартувальна твердість (HRC 28...30) спостерігається у серединній частині довжиною 25...35 мм; до обох

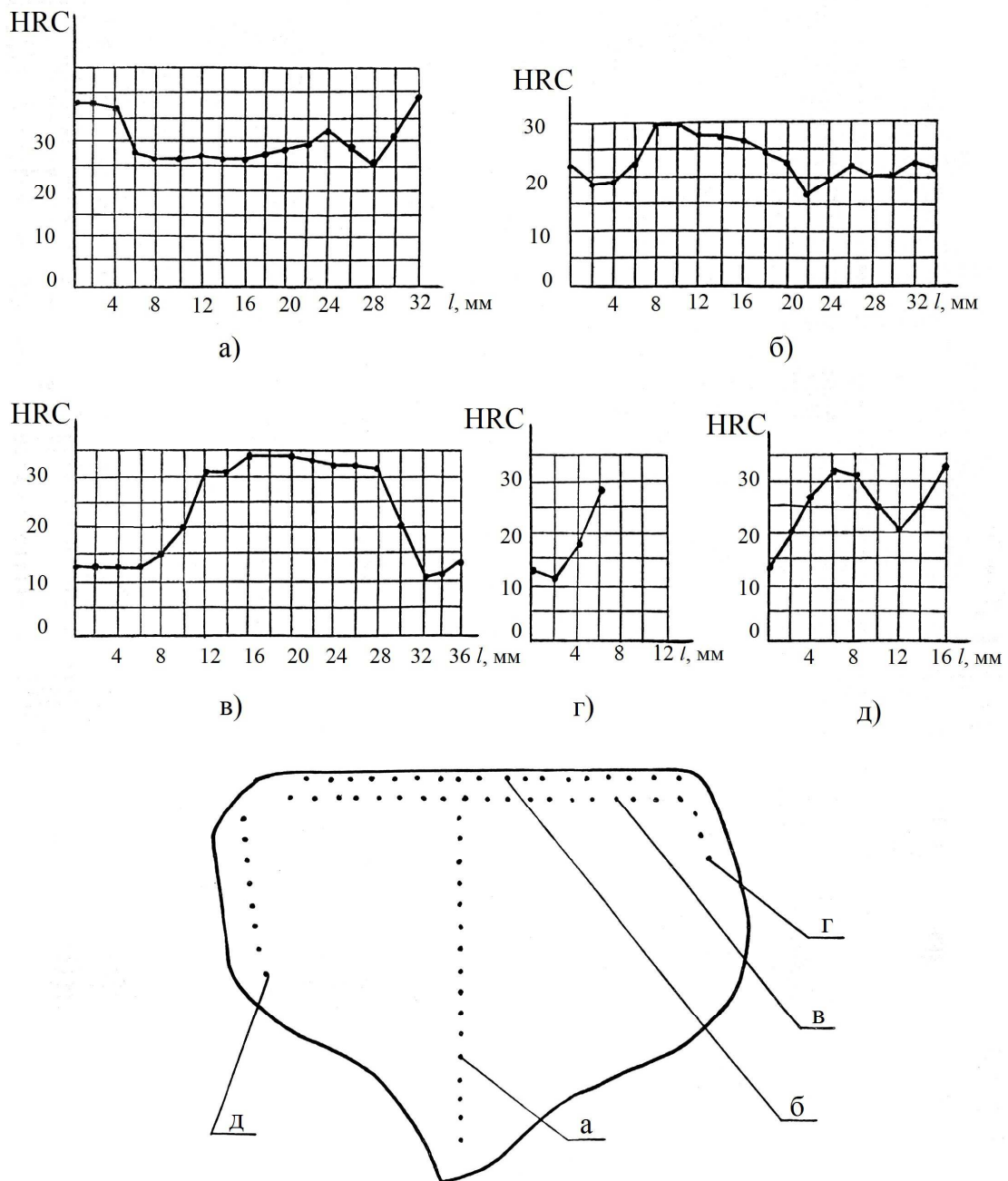


Рис. 1. Епюри розподілу твердості за перерізом нової ланки

бокових поверхонь твердість знижується до HRC 12...20. Показово, що еквідистантний розподіл твердості на глибині 5 мм від робочої поверхні (рис.1,в) якісно не схожий. Гартувальна твердість складає HRC 33...35, серединна зона з такою твердістю поширена на 40..50 мм, а зниження твердості до бокових поверхонь до HRC 12...15 більш виражене. Глибина зниженої твердості складає 12...15 мм. Зниження твердості бокових поверхонь ланок підтверджується епюрами, побудованими для внутрішньої (рис.1, г) та зовнішньої (рис.1, д) поверхонь.

Аналізуючи отримані епюри твердості, слід відмітити, що термічно зміцненою є лише робоча поверхня. При цьому гартування проведено, очевидно, в окислювальному середовищі, яке спричинило знеуглецьовування і, як наслідок, зниження поверхневої твердості на HRC

3...5. Можна також припустити, що зниження поверхневої твердості до бокових поверхонь спричинене нерівномірністю нагріву (наприклад, при використанні індуктора невідповідного розміру).

Проте нерівномірний розподіл твердості не варто вважати технологічною вадою. На наш погляд, така характеристика робочої поверхні є припустимою з точки зору кращої оброблюваності та працездатності ланки. По-перше, позитивний градієнт твердості від поверхні за глибиною виключає глибинне виривання металу та сприяє покращенню припрацювання. По-друге, наявність бокових зон зі зниженою твердістю на робочій поверхні, на наш погляд, зменшує ймовірність розповсюдження магістральних тріщин поперек поверхні тертя. Наявність приповерхневого шару підвищеної твердості також збільшує несучу здатність ланки та, як наслідок, її довговічність.

На рис.2. представлені епюри твердості за аналогічними перерізами зношених ланок. Епюра твердості за глибиною у середині перерізу (рис.2, а) не зазнала суттєвих змін. Спостерігається деяке (на HRC 3...5) зменшення твердості поблизу робочої поверхні. На робочій поверхні твердість розподілена більш рівномірно (рис.2, б) і не має суттєвих спадів до бокових поверхонь. Показовим є вирівнювання твердості по всій ширині робочої поверхні до рівня HRC 25...33 з помітним полем розсіювання значень твердості. Підвищення твердості на крайніх ділянках робочої поверхні, що мали до зношування значення HRC 12...20, можна пояснити їх фрикційно-деформаційним зміцненням. На еквідистантній глибині порядку 5мм від поверхні (рис.2, в) твердість характеризується однорідним розподілом з малим розсіюванням значень (амплітуда розсіювання складає HRC 2 і лежить у межах похибки вимірювання).

Таким чином, порівняння епюр твердості до та після зносу показує вирівнювання твердості по поверхні тертя внаслідок фрикційно-деформаційного зміцнення. Ступінь наклепу сягає 1,6...2,0.

За зміною твердості та глибиною деформаційного зміцнення можна оцінити максимальне навантаження на ланки. Так, початкова твердість HRC 12 (HB 197) збільшилася до HRC 30 (HB 293), глибина зміцнення склала близько 5 мм. Отже,

$$P = 0,755 \cdot \frac{197 + 293}{2} \cdot 5^2 = 4691,75H$$

За нормативними вимогами [11] твердість робочої поверхні нових ланок повинна бути HRC 45...47. Дослідження показали, що насправді режим термообробки, який практикується, не забезпечує такого рівня. Розходження складає 12 одиниць HRC.

Під час роботи бокові поверхні ланок контактують з ребордами котків, у результаті чого відбувається фрикційно-деформаційне зміцнення бокових поверхонь ланок та вирівнювання епюри твердості до гартувальних значень.

Середню мікротвердість визначали, виходячи з характеру варіаційного ряду результатів 24 вимірювань з використанням властивостей адитивності гетерогенного сплаву. Якщо значення мікротвердості варіаційного ряду не розбивалися на групи, середню мікротвердість обчислювали як середнє арифметичне усіх замірів.

Розподіл мікротвердості за нормаллю до робочої поверхні серійних котків (рис.3) характеризується помітним розкидом значень на глибині до 300...350 мкм відносно середнього значення порядку H_{100} 550. Амплітуда коливань складає H_{100} 100...120. Мікротвердість на поверхні дорівнює H_{100} 600. На глибині 350...900 мкм значення мікротвердості стабілізуються. Середнє значення мікротвердості зберігається на рівні H_{100} 550. На глибині понад 900 мкм розподіл мікротвердості відрізняється виразною дисперсією: амплітуда коливань сягає H_{100} 250 відносно середнього значення H_{100} 550.

На підставі описаного можна зробити висновок про те, що розподіл мікротвердості на глибині понад 900 мкм характеризує початковий технологічний стан матеріалу котка як неоднорідний. Зовнішній шар характеризується також розкидом значень мікротвердості, що указує на локальні явища зміцнення та знеміцнення металу. Прошарок зі стабілізованою мікротвердістю — «опірний» — можна вважати сформованим під час роботи. Відносно цього шару фрикційне зміцнення у зовнішньому шарі сягає 1,22, знеміцнення — 0,76.

Під час зношування в «опірному» шарі, найімовірніше, відбувається зміцнення-знеміцнення з одночасною стабілізацією мікротвердості у нижче розташованих шарах.

Вважаючи, що пластична деформація розповсюджується на глибину порядку 3 мм, розрахуємо навантаження на опірний коток [12, 13]:

$$P = 0,766 \cdot \bar{H} \cdot t^2 = 0,766 \cdot 600 \cdot 3^2 = 413,64 \text{ кН}$$

Розраховане зусилля відповідає навантаженню на перший коток (внутрішня доріжка) при врізанні з переміщенням (38 кН) або на зовнішній бік останнього котка при русі «задній хід» (35 кН).

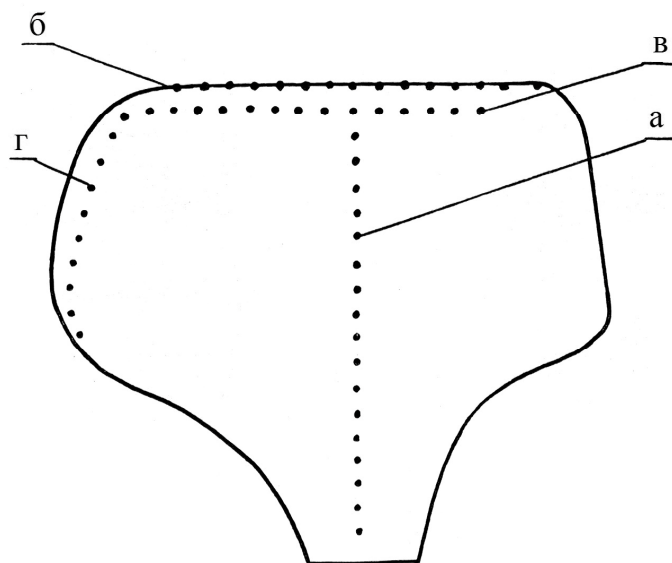
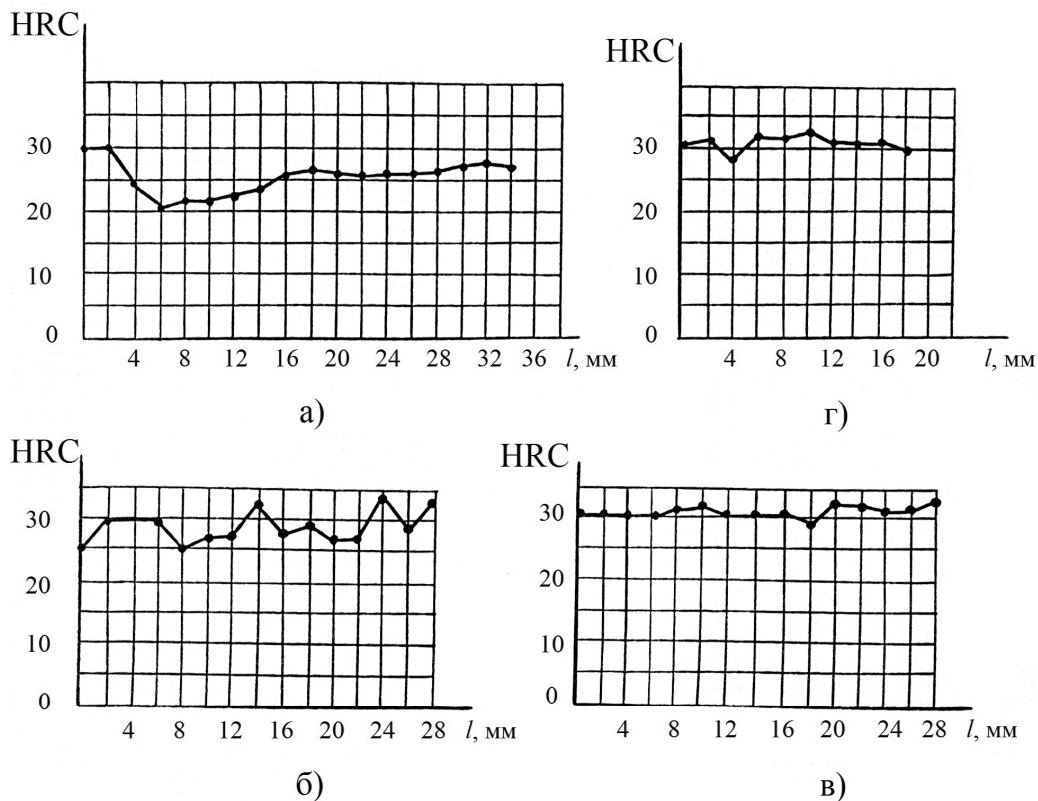


Рис.2. Епюри розподілу твердості за перерізом зношеної ланки

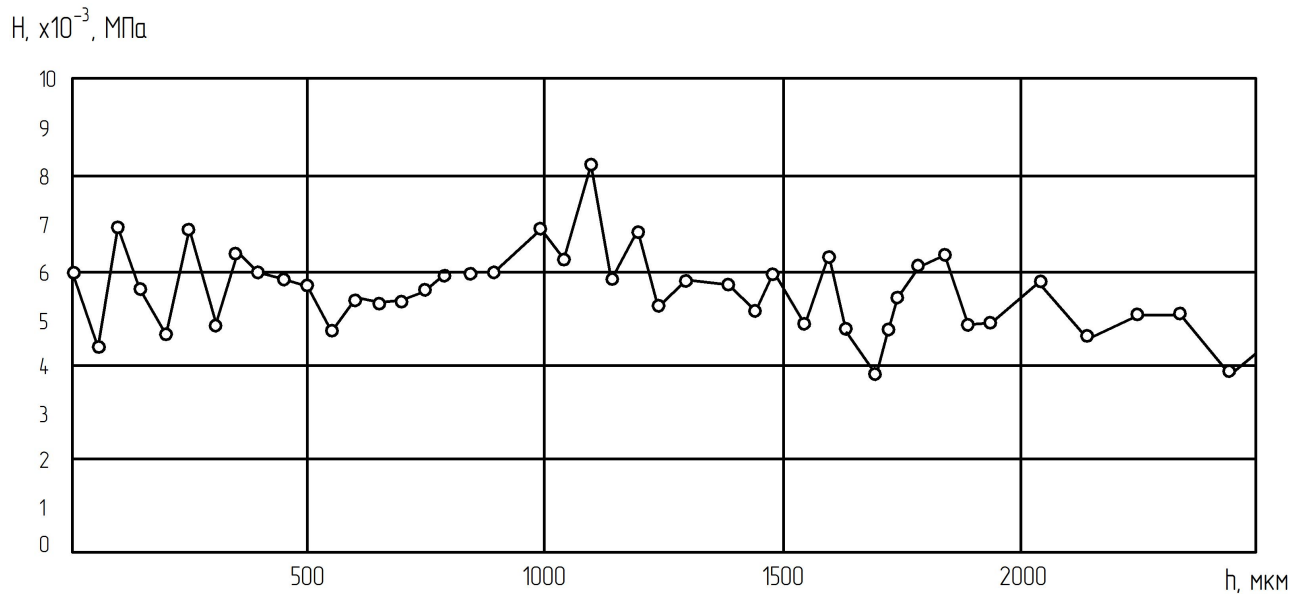


Рис. 3. Розподіл мікротвердості робочої поверхні серійних котків

Помилка розрахунку складає

$$\Delta = \frac{4136 - 3800}{4136} = 0,081,$$

що є прийнятним для інженерних розрахунків.

Варто підкреслити, що розраховані зусилля на котки є найбільшими (амплітудними). У розрахунку котків на довговічність за цими зусиллями уже закладено певний запас міцності, так як середні навантаження у 1,5...2,0 рази менші.

Висновки

Дослідження розподілу твердості за перерізом нових ланок виявили початкове нерівномірне, зі спадом твердості до боків, термічне зміцнення лише робочої поверхні. Під час експлуатації — як наслідок фрикційно-деформаційного зміцнення — відбувається зменшення твердості за глибиною на HRC 3...5 та вирівнювання по ширині робочої зони до рівня HRC 25...33 проти HRC 12...20 початкових. Вимірювання мікротвердості у перерізі котків виявило неоднорідність початкового стану металу, який у процесі експлуатації піддається стабілізації за рахунок багаторазового зміцнення-знеміцнення. За зазначеними змінами оцінено максимально припустиме навантаження і визначено, що режим термообробки при виготовленні нових деталей не забезпечує необхідних властивостей поверхневого шару. Виявлені факти визначено як обов'язкові до врахування на етапі підбору матеріалу, який слід наносити при відновленні зношених деталей, а також призначенні режиму наступної термообробки.

Список використаної літератури

1. Рябцев И.А., Сенченков И.К. *Теория и практика наплавочных работ*. К.: „Екотехнологія”, 2013. 400 с.
2. Лашенко Г.И. *Современные технологии сварочного производства*. К.: „Екотехнологія”, 2012. 720 с.
3. Мозок В.М. Наплавка опорных катков и натяжных колес гусеничных машин. *Автоматическая сварка*, 1984. №.12. С.61–62.
4. Молодик М.В. *Підвищення якості відновлення деталей машин*. К.: Урожай, 1988. 175 с.
5. A. J. W. Moore and W. J. McGee. Relation between Friction and Hardness. *Tigard Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. Vol. 212, No. 1111 (May 22, 1952), pp. 452–458.

6. Перемітько В.В., Коломоєць І.В., Борщенко А.М. Проектування технології відновлення деталей гусеничного рушія з урахуванням умов наступної експлуатації. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету: (технічні науки)*. Кам'янське. 2015. Вип.2 (27). С.45–49.
7. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безысность). М.: Изд-во МСХА. 2001. 616 с.
8. Закалов О.В. *Основи тертя і зношування в машинах*: Навчальний посібник/ О.В. Закалов, І.О. Закалов. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулія, 2011. 322 с.
9. I. E. Zvonarev and S. L. Ivanov. Analysis of changes in hardness of a metal surface layer in areas of high stress and methods of determining residual life of parts for mining machines. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 116 (2016) 012006. doi:10.1088/1757-899X/116/1/012006.
10. Garbar, I. *Microstructural Changes in Surface Layers of Metal*. During Running-in Friction Processes. *Meccanica* 36, 631–639 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1016392618802>
11. *Основи технології відновлення і упрочнення деталей машин*: Учебн. пособие. В 2-х т./ Ю.А.Харламов. Луганськ: СУНУ ім.В.Даля, 2003.
12. Зорин В.А. *Основи довговечності строительных и дорожных машин*: Учеб.пособие. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
13. Крагельский И.В. *Основи расчетов на трение и износ* / И.В.Крагельский, М.Н.Добрынин, В.С.Добрынин. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

CHANGES IN THE DISTRIBUTION OF HARDNESS AND MICROHARDNESS ACCORDING TO THE CROSS SECTION OF CONTINUOUS TRACK DETAILS AS A RESULT OF THEIR WEAR

Peremitko V., Lee M., Kriventsov D.

Abstract

The performance of the “base-applied layer” system, that forms the contact surface of parts that are subject to intensive wear, significantly depends on the gradient of mechanical characteristics in depth in the near-surface areas of contact parts. That is why the initial data before the design of the technology determines the hardness of the base material and the requirements for the material of the layer that should be applied during restoration or strengthening. This usually takes into account the initial mechanical characteristics of the new part, without taking into account the changes that occur with the material during operation, which is often accompanied by prolonged thermal exposure. Ignoring this fact during the development of renovation technology can significantly reduce its effectiveness. It is also important to know the value of hardness and microhardness in order to adequately assess the processes that accompany the wear of parts and predict its intensity.

Therefore, when restoring each specific part after its wear, it is necessary to take into account the specific changes that have occurred in the surface layer of the contact surface. The aim of the study was to experimentally determine the hardness and microhardness of the surface layer material in the areas of greatest change in the initial geometry of the links and rollers of the continuous track to take into account the values obtained while developing their renovation technology.

Studies of the distribution of hardness in the cross section of the new links revealed the initial uneven, with a decrease in hardness to the sides, thermal hardening of only the working surface. During operation (as a consequence of friction-deformation hardening) there is a decrease in hardness in depth by HRC 3...5 and alignment in the width of the working area to the level of HRC 25...33 against initial HRC 12...20. Studies of static microhardness in the cross section of new and worn rollers revealed the initial state of the material as inhomogeneous, which in the process of wear can be stabilized due to repeated hardening-softening. According to these changes, the maximum allowable load is estimated and it is determined that the heat treatment mode in the manufacture of new parts does not provide the required properties of the surface layer. This should be taken into account when selecting

the material of the surface layers, which should be welded when restoring worn-out links and rollers, as well as when appointing the next heat treatment.

References

- [1] Ryabtsev, I.A., & Senchenkov, I.K. (2013). *Teoriya i praktika naplavochnykh rabot [Theory and practice of surfacing]*. Kyiv: Yekotekhnologiya [in Russian].
- [2] Lashchenko, G.I. (2021). *Sovremennyye tekhnologii svarochnogo proizvodstva [Modern technologies of welding production]*. Kyiv: Yekotekhnologiya [in Russian].
- [3] Mozok, V.M. (1984). Naplavka opornykh katkov i natyazhnykh koles gusenichnykh mashin [Surfacing of track rollers and idler wheels of caterpillar machines]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 12, 61-62. [in Russian].
- [4] Molodyk, M.V. (1988). *Pidvyshchennya yakosti vidnovlennya detaley mashyn [Improving the quality of restoration of machine parts]*. Kyiv: Urozhay [in Ukrainian].
- [5] Moore, A. J. W., & McGee, W. J. (1952). Relation between Friction and Hardness. *Tigard Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 452-458.
- [6] Peremit'ko, V.V., & Kolomojets', I.V., & Borshchenko, A.M. (2015). Proektuvannya tekhnologiyi vidnovlennya detaley husenychnoho rushiya z urakhuvannyam umov nastupnoyi eksploataciyi [Design of technology of restoration of details of the caterpillar propulsion taking into account conditions of the subsequent operation]. *Zbirnyk naukovykh prats` Dniprov's'koho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu: (tekhnichni nauky) – Collection of scientific works of the Dniprovsky State Technical University: (technical sciences)*, 2 (27), 45-49 [in Ukrainian].
- [7] Garkunov, D.N. (2001). *Tribotekhnika (iznos i bezysnosnost') [Tribotechnics (wear and tear)]*. M.: MSKHA [in Russian].
- [8] Zakalov, O.V., & Zakalov, I.O. (2011). *Osnovy tertya i znoshuvannya v mashynakh: Navchal'nyy posibnyk [Basics of friction and wear in machines: Textbook]*. Ternopil': TNTU im. I.Pulyuya [in Ukrainian].
- [9] Zvonarev, I.E., & Ivanov, S.L. (2016). Analysis of changes in hardness of a metal surface layer in areas of high stress and methods of determining residual life of parts for mining machines. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 116* 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/116/1/012006>
- [10] Garbar, I. (2001). Microstructural Changes in Surface Layers of Metal. *During Running-in Friction Processes. Meccanica*, 36, 631–639. <https://doi.org/10.1023/A:1016392618802>
- [11] Kharlamov, YU.A. (2003). *Osnovy tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin.: Uchebn. posobiye [Fundamentals of technology for the restoration and hardening of machine parts: Textbook]*. Lugans'k: SUNU im.V.Dalya [in Russian].
- [12] Zorin, V.A. (1986). *Osnovy dolgovechnosti stroitel'nykh i dorozhnykh mashin: Ucheb.posobiye [Fundamentals of durability of construction and road machines: Textbook]*. M.: Mashinostroyeniye [in Russian].
- [13] Kragel'skiy, I.V., Dobrynin, M.N., & Dobrynin, V.S. (1977). *Osnovy raschetov na treniye i iznos [Fundamentals of Friction and Wear Calculations]*. M.: Mashinostroyeniye [in Russian].