

УДК 621.9.048.7

doi:10.20998/2413-4295.2022.03.04

**СЕЛЕКТИВНЕ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ВАЛУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕДАЧ
РОБОТИЗОВАНОЮ ЛАЗЕРНОЮ 3D СИСТЕМОЮ****Д. А. ЛЕСИК^{1*}, М. ГРУШКА², К. Ю. СІДУН¹, О. О. ДАНИЛЕЙКО¹, Д. С. КИФОРЕНКО¹,
В. В. ДЖЕМЕЛІНСЬКИЙ¹**

¹ кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

² науково-дослідний центр нових технологій, Університет Західної Богемії, Пльзень, ЧЕСЬКА РЕСПУБЛІКА

*e-mail: lesyk_d@ukr.net

АНОТАЦІЯ Запропоновано роботизований лазерний метод 3D-зміцнення в якості фінішної операції для збільшення зносостійкості готових металевих виробів. Процес лазерного зміцнення поверхневого шару виробів шляхом зміни його структури є одним із найбільш ефективних методів селективного поверхневого зміцнення. Термічне зміцнення металів та сплавів лазерним випромінюванням ґрунтується на локальному нагріванні ділянки поверхні під впливом випромінювання та подальшому охолодженні цієї поверхневої ділянки з надкритичною швидкістю внаслідок тепловідведення теплоти у внутрішні шари металу. Використана роботизована лазерна 3D система (промисловий робот FANUC та сканувальна оптика SCANLAB) дозволяє обробляти поверхні будь-якої складності та геометрії, включаючи вали механізму передач сівалки зернотукової. Виявлено, що розробка й удосконалення технологічного процесу виготовлення сталевих валів редуктора сівалки зернотукової є актуальною технологічною задачею внаслідок швидкого виходу валу із експлуатації, що призводить до витрат часу та коштів на його заміну. Найбільш навантаженні ділянки валу було попередньо оцінено з використанням пакету програмного забезпечення SolidWorks Simulation. Для високоякісної лазерної поверхневої обробки валу механізму передач із сталі 65Г, застосовується високопотужний дисковий твердотільний лазер TruDisk 8002 з максимальною потужністю лазера 8 кВт. Лазерна поверхнева термообробка здійснювалась за стратегією постійної потужності (безперервний режим), варіюючи потужність лазера в межах 1,35–2,25 кВт. На основі двокомпонентної діаграми стану Fe-Mn, попередньо передбачали критичні точки температури повної аустенізації досліджуваної сталі з урахуванням хімічного складу матеріалу. Крім цього, оцінювали величини щільності енергії лазерного променя діаметром 1 мм на робочій поверхні. Результати показали, що твердість поверхні валу була приблизно в 2,5 рази вище проти необробленої поверхні. Встановлено робочі діапазони параметрів лазерної термообробки валу редуктора для підвищення інтенсивності зміцнення (100–150%) відповідальних зон.

Ключові слова: вал механізму передач; лазерне поверхнєве зміцнення; сталь 65Г; роботизоване 3D сканування; поверхневий шар; твердість поверхні; інтенсивність зміцнення

**SELECTIVE SURFACE HARDENING OF GEAR MECHANISM SHAFT BY
ROBOTIC LASER 3D SYSTEM****D. LESYK¹, M. HRUSKA², K. SIDUN¹, O. DANYLEIKO¹, D. KYFORENKO¹,
V. V. DZHEMELINSKYI¹**

¹ Laser Systems and Advanced Technologies Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", City, UKRAINE

² New Technologies Research Centre, University of West Bohemia, Pilsen, CZECH REPUBLIC

ABSTRACT A robot-based laser 3D hardening method is proposed as a finishing operation to increase the wear resistance of the metal end-products. The laser hardening process of the surface layer of the products by changing its structure is one of the most effective methods of selective surface hardening. Thermal hardening of metals and alloys by laser radiation is based on local heating of a surface area under the influence of radiation and subsequent cooling of this surface area at a supercritical speed due to heat removal into the inner layers of the metal. The used robot-based laser 3D system (FANUC industrial robot and SCANLAB scanning optics) allows processing the surfaces of any complexity and geometry, including the shafts of the gear mechanism of the seed drill. It was found that the development and improvement of the technological process of manufacturing steel shafts of the gearbox of the seed drill is an urgent technological problem due to the rapid retirement of the shaft, which leads to the expenditure of time and money for its replacement. The most heavily loaded sections of the shaft were pre-estimated using the SolidWorks Simulation software package. A high-power TruDisk 8002 solid-state disk laser with a maximum laser power of 8 kW and a wavelength of laser radiation of 1030 nm is used for high-quality laser surface treatment of the AISI 1066 steel shaft of the gear mechanism. The laser surface heat treatment was carried out using a constant power strategy (continuous mode), varying the laser power in the range of 1.35–2.25 kW. Based on the Fe-Mn two-component state diagram, the critical points of the temperature of complete austenization of the studied steel were previously predicted taking into account the chemical composition of the material. Additionally, the energy density values of the laser beam with a diameter of 1 mm on the working surface was estimated. The results showed that the surface hardness of the shaft was about 2.5 times higher compared to the untreated surface. The working ranges of laser heat

treatment parameters of the gearbox shaft were established to increase the hardening intensity (100–150%) of the responsible areas.

Keywords: gear mechanism shaft; laser surface hardening; AISI 1066 steel; disc laser; robot-based 3D scanning; surface layer; surface hardness; hardening intensity

Вступ

Для поліпшення якісних та експлуатаційних властивостей сталевих деталей найбільш перспективними є методи поверхневого зміцнення шляхом зміни структури та механічних властивостей поверхневого шару.

Актуальним і важливим у машинобудуванні є метод підвищення довговічності конструкційних сталевих виробів за рахунок селективного поверхневого зміцнення їх робочих зон лазерним випромінюванням [1–3]. Відомо, що лазерне поверхневе зміцнення сталей, за аналогією з іншими видами гартування, полягає у формуванні аустенітної структури з розчиненням карбідних фаз на етапі високошвидкісного нагрівання та її наступному перетворенні в мартенсит на етапі охолодження за рахунок поглинання та передачі енергії високої концентрації тонкому поверхневому шарі. Швидкості нагрівання та охолодження близько 10^8 до 10^{10} °C/с, які дозволяють створювати дрібнозернисті мікроструктури високої твердості [4,5].

Стимулюючим чинником у розвитку технології лазерного поверхневого зміцнення є поява на ринку сучасних потужних твердотільних лазерів (діодних, волоконних, дискових) із вищим сумарним рівнем техніко-економічних показників порівняно з традиційними лазерами [6–9]. Порівняно з випромінюванням CO₂ лазерів [8,10,11], важливою особливістю твердотільних лазерів є те, що лазерне випромінювання з довжиною хвилі близько 1 мкм краще взаємодіє з поверхнею металів [12–14]. Лазери безперервної хвилі в поєднанні зі сканувальною оптикою забезпечують високу продуктивність обробки та рівномірність гартування, а також дозволяють обробляти профілі складної форми [15].

Останнім часом широко досліджуються властивості та мікроструктура поверхні, сформовані діодним [3,6,16,17] і волоконним [9,14,18] лазерами. Застосування діодних лазерів і волоконних лазерів у поєднанні із сканувальною оптикою призводить до більшої глибини та ширини зміцнення та однорідної структури в приповерхневих шарах [19]. Потужні дискові лазери з високою якістю променя можуть бути використані для лазерної термообробки (ЛТО) металевих виробів складної форми [7,20]. У той же час програмована фокусувальна оптика в поєднанні з роботизованим обладнанням з числовим програмним керуванням (ЧПК) дозволяє виконувати завдання дистанційного гартування в тривимірному (3D) робочому просторі. У роботі [21], показано, що в зразку із конструкційної сталі товщиною 10 мм після ЛТО за допомогою дискового лазера в поєднанні зі сканувальною оптикою було досягнуто глибини зміцнення до 3 мм. У дослідженні [5] зазначено

переваги технології лазерного 3D зміцнення для обробки поверхонь сталевих деталей. Тим не менш, слід також зазначити, що параметри лазерного термозміцнення з використанням дискового лазера повинні бути оптимізовані для поверхневого зміцнення конструкційних матеріалів.

Крім того, слід зазначити, що розробка й удосконалення технологічного процесу виготовлення сталевих валів редуктора сівалки зернотукової є актуальною задачею в сільськогосподарській галузі внаслідок швидкого виходу валу із експлуатації, що призводить до витрат часу/коштів на його заміну. Застосування лазерної поверхневої термообробки після механообробки та нормалізованого відпалу дозволить підвищити надійність та довговічність даних деталей у вузлі механізму передач за рахунок підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару. Таким чином, збільшення ресурсу роботи валів редукторів є актуальною проблемою та має велике практичне значення.

Мета роботи

Метою даної роботи є підвищення властивостей та інтенсивності зміцнення сталевих виробів складної форми з використанням роботизованої лазерної 3D системи.

Методи дослідження

Для того щоб визначити найбільш навантажені ділянки валу механізму передач сівалки зернотукової в умовах експлуатації, попередньо проведено дослідження напруженого стану з використанням модулю «SolidWorks Simulation Express» (рис. 1а).

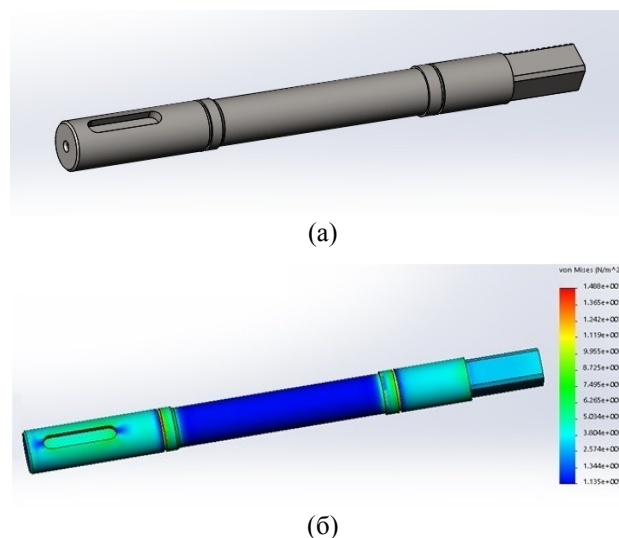


Рис. 1 – 3D-модель валу (а) та найбільш навантажені ділянки валу (б)

Результати показали, що величини границі плинності досліджуваного валу перевищували допустиму величину в декілька разів (рис. 16). Для більшої наочності результатів дослідження (границю міцності, переміщення та деформацію), модулями програмного забезпечення було створено модель з можливими деформаціями деталі «вал механізму передачі».

Найбільш навантаженні ділянки валу (в місцях закріплення зірочки та шестерні) було піддано лазерному термозміцненню з використанням високопотужного дискового лазера TRUMPF TruDisk 8002 та 3D сканувальної оптики, розміщеної в руці промислового робота FANUC (рис. 2).

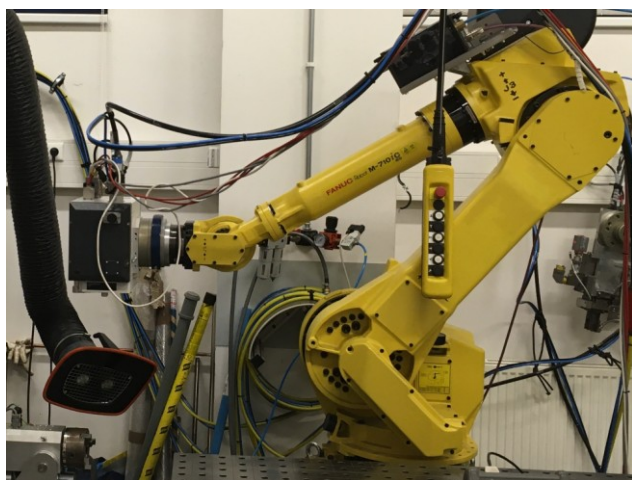


Рис. 2 – Загальний вигляд робочої ділянки

Використаний дисковий твердотільний лазер TruDisk 8002 (160–8000 Вт), з довжиною хвилі лазерного випромінювання 1030 нм є компактним лазером (1990x1550x1200 мм). На відміну від стрижневого лазера, дисковий не створює ефекту теплової лінзи, що робить джерело випромінювання особливо нечутливим при регулюванні.

Лазерний промінь передається до сканувальної оптики SCANLAB за допомогою оптоволокна діаметром 200 мкм. Сканувальна головка здатна обробляти еліптичне / кубоподібне поле зображення розміром $385 \times 300 \text{ мм}^2 / 220 \times 220 \times 140 \text{ мм}^2$. Процес сканування лазерного променя на оброблюваній поверхні контролювався модулем RobotSync та/або програмним забезпеченням SAMLight. ЛТО поверхні валу здійснювали безперервним режимом.

При роботі на даному лазерному роботизованому комплексі основними параметрами є: потужність лазера, розміри лазерного променя та швидкість обертання оброблюваної поверхні / швидкість сканування лазерного променя. Діаметр лазерного променя (1 мм), амплітуда сканування (10 мм), швидкість сканування та швидкість переміщення оброблюваної поверхні були постійними в даній роботі (табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри лазерної термообробки

| Номер режиму обробки | Потужність, P (кВт) | Швидкість сканування, V (мм/с) | Швидкість обертання, n (об/хв) |
|----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| ЛТО1 | 1,35 | 20000 | 8,4 |
| ЛТО2 | 1,65 | | |
| ЛТО3 | 1,95 | | |
| ЛТО4 | 2,25 | | |

На основі двохкомпонентної діаграми стану Fe-Mn, попередньо передбачали критичні точки температури повної аустенізації досліджуваної сталі з урахуванням величини щільності енергії лазерного променя та хімічного складу матеріалу (табл. 2). Температура плавлення конструкційної сталі 65Г становить приблизно $1550 \text{ }^\circ\text{C}$. Вихідна поверхнева твердість валу складає приблизно 200 HV_5 .

Таблиця 2 – Хімічний склад сталі 65Г

| Mn | C | Si | Cr | Cu |
|---------|----------|-----------|-------------|------------|
| 0,9-1,2 | 0,62-0,7 | 0,17-0,37 | $\leq 0,25$ | $\leq 0,2$ |

Розрахована величина щільності енергії лазерного променя дорівнює $\sim 4,5$, $\sim 5,5$, $\sim 6,5$ та $\sim 7,5 \text{ Дж/мм}^2$ відповідно після лазерної обробки ЛТО1 ($P = 1,35 \text{ кВт}$), ЛТО2 ($P = 1,65 \text{ кВт}$), ЛТО3 ($P = 1,95 \text{ кВт}$) та ЛТО4 ($P = 2,25 \text{ кВт}$) (табл. 1).

Поверхневу макротвердість вимірювали твердоміром GE MIC 20 TFT при навантаженні на індентор 5 кгс (50 Н). У всіх випадках було проведено загалом десять вимірювань на різних оброблених ділянках і приведено усереднені значення. Інтенсивність поверхневого зміцнення ($I_{\text{зміц.}}$) оцінювали за величинами HV поверхневої твердості вихідного ($\text{HV}_{\text{вих.}}$) та зміцненого ($\text{HV}_{\text{зміц.}}$) валу за формулою $I_{\text{зміц.}} = (\text{HV}_{\text{зміц.}} - \text{HV}_{\text{вих.}}) / \text{HV}_{\text{вих.}} \cdot 100\%$.

Результати та їх обговорення

Значення твердості поверхні приведено на рис. 3. Експерименти лазерної термообробки показали, що порівняно із незагартованими ділянками, твердість поверхні збільшується при підвищенні потужності лазерного променя. Твердість поверхні валу складає приблизно 330 HV_5 після ЛТО1 (рис. 3).

Подальше збільшення потужності лазерного променя приводить до зростання величин твердості поверхні приблизно в 2,5 рази відповідно після лазерного гартування при потужності лазера 1,95 кВт (режим ЛТО3) та 2,25 кВт (режим ЛТО4). Це пояснюється утворенням дрібнозернистої мартенситної мікроструктури в приповерхневому шарі [22]. Приведені значення поверхневої твердості та тенденції добре корелюють з літературними даними [7,17,20].

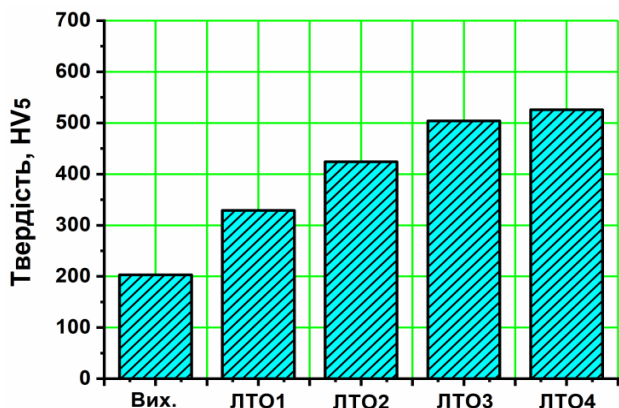


Рис. 3 – Твердість поверхні валу із сталі 65Г

За результатами інтенсивності зміцнення (рис. 4) видно, що визначені значення $I_{\text{зміц.}}$ оброблених зон лазерним сканувальним променем зросли відповідно приблизно на 70%, 115%, 150% і 155% після обробки на режимах ЛТО1, ЛТО2, ЛТО3 та ЛТО4. Слід також зазначити, що величини твердості на плоских поверхнях добре корелюють з величинами твердості на циліндричних поверхнях.

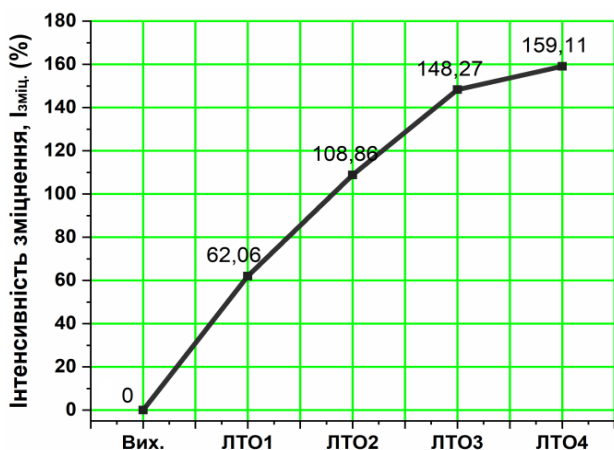


Рис. 4 – Інтенсивність зміцнення валу із сталі 65Г

Крім того, збільшення величини потужності лазера (1,95–2,25 кВт) не веде до збільшення твердості поверхні (500–525 HV₅) (рис. 1). У зв'язку з цим рекомендується застосовувати режим лазерного оброблення ЛТО3 для забезпечення загартованої поверхні без оплавлення.

Висновки

Запропоновано роботизований лазерний метод 3D-зміцнення для локального підвищення твердості поверхні та відповідно зносостійкості найбільш навантажених ділянок валу із сталі 65Г. На основі проведених експериментальних досліджень, встановлено робочі діапазони параметрів лазерного термозміцнення робочих поверхонь валу редуктора

сівалки зернотукової з використанням дискового лазера та сканатора: потужність лазерного променя 2,0 кВт, швидкість обертання оброблюваного валу 8,4 об/хв, швидкість сканування лазерного променя 20000 мм/с, розміри лазерного променя 1 x 10 мм. При використанні вище зазначених режимів ЛТО, твердість поверхні збільшується приблизно в 2,5 рази в порівнянні із необробленою поверхнею (~200 HV₅).

Подяки

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти, молоді та спорту Чеської Республіки та Міністерства освіти і науки України (проект № 0121U113829 та № 0122U002389).

Список літератури

- Li R., Jin Y., Li Z., Qi K. A comparative study of high-power diode laser and CO₂ laser surface hardening of AISI 1045 steel. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014. Vol. 23. P. 3085-3091. doi: 10.1007/s11665-014-1146-x.
- Barka N., El Ouafi A. E. Effects of laser hardening process parameters on case depth of 4340 steel cylindrical specimen – A statistical analysis. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2015. Vol. 5. P. 124-135. doi: 10.4236/jsemat.2015.53014.
- Muthukumar G., Babu P. D. Analysis of residual stress distribution and corrosion in laser surface hardened low alloy steel with a flat top-hat laser beam, using a high-power diode laser. *Arab. J. Sci. Eng.* 2022. Vol. 47. P. 8785-8803. doi: 10.1007/s13369-021-06350-8.
- Roy S., Zhao J., Shrotriya P., Sundararajan S. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel. *Tribol. Int.* 2017. Vol. 112. P. 94-102. doi: 10.1016/j.triboint.2017.03.036.
- Babic M., Balic J., Kokol P. Optimal fractal dimension on grain structure robot laser-hardened tool steel. *Adv. Prod. Eng. Manag.* 2014. Vol. 9. P. 119-127. doi: 10.14743/apem2014.3.181.
- Araj T. Analysis of residual stress distribution and corrosion in laser surface hardened low alloy steel with a flat top-hat laser beam, using a high-power diode laser. *Int. J. Automation Technol.* 2022. Vol. 14. P. 534-545. doi: 10.20965/ijat.2020.p0534.
- Frerichs F., Lu Y., Lubben T., Radel T. Process signature for laser hardening. *Metals.* 2021. Vol. 11. 465. doi: 10.3390/met11030465.
- Jerniti A. G., Ouafi A. E., Barka N. Single track laser surface hardening model for AISI 4340 steel using the finite element method. *Model. Numer. Simul. Mater. Sci.* 2018. Vol. 6. P. 17-27. doi: 10.4236/mnsms.2016.62003.
- Лесик Д. А., Джemelінський В. В., Мордюк Б. М., Прокопенко Г. І., Данилейко О. О. Визначення оптимальних режимів комбінованого лазерно-ультразвукового зміцнення інструментальної сталі Х12МФ. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 23. С. 127–135. doi: 10.20998/2413-4295.2017.23.05.
- Orazi L., Rota A., Reggiani B. Experimental investigation on a novel approach for laser surface hardening modeling. *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 2021. Vol. 16. 2. doi: 10.1186/s40712-020-00124-0.

11. Hung T. P., Shi H. E., Kuang J. H. Temperature modeling of AISI 1045 steel during surface hardening processes. *Mater.* 2018. Vol. 11. 1815. doi: 10.3390/ma11101815.
12. Данилейко О. О., Джемелінський В. В., Лесик Д. А., Бернадський А. В. Підвищення ефективності поверхневого зміцнення металевих виробів комбінованою термомодифікаційною обробкою. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 1. С. 103–110. doi: 10.37128/2306-8744-2020-1-11.
13. Tarchoun B., Ouafi A. E., Chebak A. Experimental investigation of laser surface hardening of AISI 4340 steel using different laser scanning patterns. *J. Miner. Mater. Met. Charact. Eng.* 2020. Vol. 8. P. 9-26. doi: 10.4236/jmmce.2020.82002.
14. Lesyk D. A., Dzhemelinskyi V. V., Martinez S., Lamikiz A., Danyleiko O. O., Hyzhevskiy V. V. Laser transformation hardening effect on hardening zone features and surface hardness of tool steel AISI D2. *Mech. Adv. Technol.* 2017. №1(79). P. 26-33. doi: 10.20535/2521-1943.2017.79.95851.
15. Liverani E., Lutey A. H. A., Ascari A., Fortunato A., Tomesani L. A complete residual stress model for laser surface hardening of complex medium carbon steel components. *Surf. Coat. Technol.* 2016. Vol. 302. P. 105-105. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.066.
16. Park C., Kim J., Sim A., Sohn H., Jang H., Chun E. J. Influence of diode laser heat treatment and wear conditions on the fretting wear behavior of a mold steel. *Wear.* 2019. Vol. 434-435. 202961. doi: 10.1016/j.wear.2019.202961.
17. Yazici O., Yilmaz S. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels. *Tribol. Int.* 2018. Vol. 119. P. 222-229. doi: 10.1016/j.triboint.2017.11.006.
18. Martinez S., Lesyk D. A., Lamikiz A., Ukar E., Dzhemelinsky V. V. Hardness simulation of over-tempered area during laser hardening treatment. *Phys. Procedia.* 2016. Vol. 83. P. 1357-1366. doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.143.
19. Sun P., Li S., Yu G., He X., Zheng C., Ning W. Laser surface hardening of 42CrMo cast steel for obtaining a wide and uniform hardened layer by shaped beams. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014. Vol. 70. P. 787-796. doi: 10.1007/s00170-013-5292-3.
20. Lee K. H., Choi S. W., Yoon T. J., Kang C. Y. Microstructure and hardness of surface melting hardened zone of mold steel SM45C using Yb:YAG disk laser. *J. Weld. Join.* 2016. Vol. 34. P. 75-81. doi: 10.5781/JWJ.2016.34.1.75.
21. Schuocker D., Aichinger J., Majer R., Spitzer O., Rau A., Harrer Th. Improved laser hardening process with temperature control avoiding surface degradation. *Proc. Materials of the 8th Int. Conf. on Photonic Technol. LANE.* 2014. P. 1-5.
22. Li Z.-X., Chen J.-S., Wang X.-N., Shen X.-J., Cen Y.-M., Chen J., Chu Y.-J., Han Y.-J. Microstructure distribution and bending fracture mechanism of 65Mn steel in the laser surface treatment. *Mater. Sci. Eng. A.* 2022. Vol. 850. 143568. doi: 10.1016/j.msea.2022.143568.
- A statistical analysis. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.*, 2015, Vol. 5, pp. 124-135, doi: 10.4236/jsemat.2015.53014.
3. Muthukumaran G., Babu P. D. Analysis of residual stress distribution and corrosion in laser surface hardened low alloy steel with a flat top-hat laser beam, using a high-power diode laser. *Arab. J. Sci. Eng.*, 2022, Vol. 47, pp. 8785-8803, doi: 10.1007/s13369-021-06350-8.
4. Roy S., Zhao J., Shrotriya P., Sundararajan S. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel. *Tribol. Int.*, 2017, Vol. 112, pp. 94-102, doi: 10.1016/j.triboint.2017.03.036.
5. Babic M., Balic J., Kokol P. Optimal fractal dimension on grain structure robot laser- hardened tool steel. *Adv. Prod. Eng. Manag.*, 2014, Vol. 9, pp. 119-127, doi: 10.14743/apem2014.3.181.
6. Araj T. Analysis of residual stress distribution and corrosion in laser surface hardened low alloy steel with a flat top-hat laser beam, using a high-power diode laser. *Int. J. Automation Technol.*, 2022, Vol. 14, pp. 534-545, doi: 10.20965/ijat.2020.p0534.
7. Frerichs F., Lu Y., Lubben T., Radel T. Process signature for laser hardening. *Metals*, 2021, Vol. 11, 465, doi: 10.3390/met11030465.
8. Jerniti A. G., Ouafi A. E., Barka N. Single track laser surface hardening model for AISI 4340 steel using the finite element method. *Model. Numer. Simul. Mater. Sci.*, 2018, Vol. 6, pp. 17-27, doi: 10.4236/mnsms.2016.62003.
9. Lesyk D. A., Dzhemelinskyi V. V., Mordyuk B. N., Prokopenko G. I., Danyleiko O. O. Vyznachennia optymalnykh rezhymiv kombinovanoho lazerno-ultrazvukovoho zmitsnennia instrumentalnoi stali Kh12MF [Determination of optimum regimes of combined laser-ultrasonic hardening and finishing of tool steel AISI D2]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. Kharkiv: NTU "KhPI"*, 2017, no. 23, pp. 127-135, doi: 10.20998/2413-4295.2017.23.05.
10. Orazi L., Rota A., Reggiani B. Experimental investigation on a novel approach for laser surface hardening modeling. *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, 2021, Vol. 16, 2, doi: 10.1186/s40712-020-00124-0.
11. Hung T. P., Shi H. E., Kuang J. H. Temperature modeling of AISI 1045 steel during surface hardening processes. *Mater.*, 2018, Vol. 11, 1815, doi: 10.3390/ma11101815.
12. Danyleiko O. O., Dzhemelinskyi V. V., Lesyk D. A., Bernatskyi A. V. Pidvyshchennia efektyvnosti poverkhniovoho zmitsnennia metalevykh vyrobiv kombinovanoi termodeformatsiinoiu obrobkoiu [Increasing the efficiency of surface strengthening of metal products by combined thermodeformation processing]. *Vibrations in Engineering and Technology*, 2020, no. 1, pp. 103-110, doi: 10.37128/2306-8744-2020-1-11.
13. Tarchoun B., Ouafi A. E., Chebak A. Experimental investigation of laser surface hardening of AISI 4340 steel using different laser scanning patterns. *J. Miner. Mater. Met. Charact. Eng.*, 2020, Vol. 8, pp. 9-26, doi: 10.4236/jmmce.2020.82002.
14. Lesyk D. A., Dzhemelinskyi V. V., Martinez S., Lamikiz A., Danyleiko O. O., Hyzhevskiy V. V. Laser transformation hardening effect on hardening zone features and surface hardness of tool steel AISI D2. *Mech. Adv. Technol.*, 2017, №1(79), pp. 26-33, doi: 10.20535/2521-1943.2017.79.95851.
15. Liverani E., Lutey A. H. A., Ascari A., Fortunato A., Tomesani L. A complete residual stress model for laser surface hardening of complex medium carbon steel

References (transliterated)

1. Li R., Jin Y., Li Z., Qi K. A comparative study of high-power diode laser and CO₂ laser surface hardening of AISI 1045 steel. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014, Vol. 23, pp. 3085-3091, doi: 10.1007/s11665-014-1146-x.
2. Barka N., El Ouafi A. E. Effects of laser hardening process parameters on case depth of 4340 steel cylindrical specimen

- components. *Surf. Coat. Technol.*, 2016, Vol. 302, pp. 105-105, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.066.
16. Park C., Kim J., Sim A., Sohn H., Jang H., Chun E. J. Influence of diode laser heat treatment and wear conditions on the fretting wear behavior of a mold steel. *Wear*, 2019, Vol. 434-435, 202961, doi: 10.1016/j.wear.2019.202961.
17. Yazici O., Yilmaz S. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels. *Tribol. Int.*, 2018, Vol. 119, pp. 222-229, doi: 10.1016/j.triboint.2017.11.006.
18. Martinez S., Lesyk D. A., Lamikiz A., Ukar E., Dzhemelinsky V. V. Hardness simulation of over-tempered area during laser hardening treatment. *Phys. Procedia*, 2016, Vol. 83, pp. 1357-1366, doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.143.
19. Sun P., Li S., Yu G., He X., Zheng C., Ning W. Laser surface hardening of 42CrMo cast steel for obtaining a wide and uniform hardened layer by shaped beams. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, Vol. 70, pp. 787-796, doi: 10.1007/s00170-013-5292-3.
20. Lee K. H., Choi S. W., Yoon T. J., Kang C. Y. Microstructure and hardness of surface melting hardened zone of mold steel SM45C using Yb:YAG disk laser. *J. Weld. Join.*, 2016, Vol. 34, pp. 75-81, doi: 10.5781/JWJ.2016.34.1.75.
21. Schuocker D., Aichinger J., Majer R., Spitzer O., Rau A., Harrer Th. Improved laser hardening process with temperature control avoiding surface degradation. *Proc. Materials of the 8th Int. Conf. on Photonic Technol. LANE*, 2014, pp. 1-5.
22. Li Z.-X., Chen J.-S., Wang X.-N., Shen X.-J., Cen Y.-M., Chen J., Chu Y.-J., Han Y.-J. Microstructure distribution and bending fracture mechanism of 65Mn steel in the laser surface treatment. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2022, Vol. 850, 143568, doi: 10.1016/j.msea.2022.143568.

Відомості про авторів (About authors)

Лесик Дмитро Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-6919-7409; e-mail: lesyk_d@ukr.net.

Dmytro Lesyk – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Laser Systems and Advanced Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6919-7409; e-mail: lesyk_d@ukr.net.

Матеї Грушка – інженер-дослідник та розробник, Університет Західної Богемії, Науково-дослідний центр нових технологій; м. Пльзень, Чеська Республіка; ORCID: 0000-0002-0488-9201; e-mail: maslej@ntc.zcu.cz.

Matej Hruska – Research and Development Engineer, New Technologies Research Centre, University of West Bohemia, Univerzita, Pilsen, Czech Republic; ORCID: 0000-0002-0488-9201; e-mail: maslej@ntc.zcu.cz.

Сідун Карина Юрївна – студент магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; e-mail: karinasidun24@gmail.com.

Karina Sidun – Master's student, Department of Laser Systems and Advanced Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: karinasidun24@gmail.com.

Данилейко Олександр Олександрович – асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспірант кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-8501-0421; e-mail: danyleiko.oleksandr@gmail.com.

Oleksandr Danyleiko – Teaching assistant, Department of Laser Systems and Advanced Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8501-0421; e-mail: danyleiko.oleksandr@gmail.com.

Кифоренко Дмитро Сергійович – студент магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; e-mail: d.kyforenko-ml71@iit.kpi.ua.

Dmytro Kyforenko – Master's student, Department of Laser Systems and Advanced Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: d.kyforenko-ml71@iit.kpi.ua.

Джемелінський Віталій Васильович – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-5797-0134; e-mail: vitaliy.dzhemelinsky@gmail.com.

Vitaliy Dzhemelinsky – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Department of Laser Systems and Advanced Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5797-0134; e-mail: vitaliy.dzhemelinsky@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лесик Д. А., Грушка М., Сідун К. Ю., Данилейко О. О., Кифоренко Д. С., Джемелінський В. В. Селективне поверхнєве зміцнення валу механізму передач роботизованою лазерною 3D системою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 24-29. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.04.

Please cite this article as:

Lesyk D., Hruska M., Sidun K., Danyleiko O., Kyforenko D., Dzhemelinsky V. Selective surface hardening of gear mechanism shaft by robotic laser 3D system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3(13), pp. 24–29, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.04.

Надійшла (received) 28.08.2022