

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.8
УДК:620.193.15:621.791.92:621.926.3

Герасімов В.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня, ORCID: 0009-0007-0391-7200, e-mail: vageras76@gmail.com

Плітченко С.О., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-0613-2544, e-mail: plit4enko@ukr.net

Перемітько В.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9032-6116, e-mail: vperemitko@dstu.dp.ua

Матяж І.О., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Herasimov Valerii, postgraduate student

Plitchenko Serhii, Candidate of technical sciences, Docent of the Department of Machine-building Technologies and Engineering

Peremitko Valerii, Doctor of technical sciences, Professor of Department of Machine-building Technologies and Engineering

Matyazh Illia, master's degree student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ОСОБЛИВОСТІ ЗНОСУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВІДНОВЛЕННЯ СЕГМЕНТА ЧЕРВ'ЯЧНОГО ШНЕКА БІСЕРНОГО МЛИНА

Під час роботи бісерного млина типу МТ-140 виявлено інтенсивне зношування молоткових сегментів черв'ячного шнека, яке призводить до зниження ступеня подрібнення сировини, викликає тривалий простій обладнання та, як наслідок, економічні втрати. Проведений аналіз умов роботи сегментів встановив комбінований гідроабразивний механізм зносу їх робочих поверхонь, який пояснюється одночасним впливом абразивних бісерних елементів та технологічної суспензії. Характер інтенсивності наведеного механізму зносу є нерівномірним по висоті черв'ячного шнека, від переважно гідроабразивного для верхніх сегментів і до майже чисто абразивного для розміщених нижче. Зважаючи на визначений механізм зносу, запропоновано відновлювати робочі поверхні сегментів електродуговим наплавленням, а в якості наплавних матеріалів – порошкові дроти різного хімічного складу. Для його уточнення запропоновано використовувати склади шихти з різним вмістом вуглецю та хрому.

Ключові слова: сірий чавун; бісерний млин; наплавлення; зносостійкість; гідроабразивний знос; порошковий дріт.

During the operation of the MT-140 type bead mill, intensive wear of the grinding segments of the worm screw was detected, which leads to a decrease in the degree of grinding of raw materials, causes long-term downtime of the equipment and, as a result, economic losses. The conducted analysis of the operating conditions of the segments established a combined hydroabrasive wear mechanism of their working surfaces, which is explained by the simultaneous influence of abrasive bead elements and technological suspension. The nature of the intensity of the given wear mechanism is uneven along the height of the worm screw, from mainly hydroabrasive for the upper segments to almost purely abrasive for the lower ones. Taking into account the determined mechanism of wear, it is proposed to restore the working surfaces of the segments by electric arc surfacing, and powder-coated wires of different chemical composition are used as surfacing materials. To clarify it, it is suggested to use charge compositions with different carbon and chromium content.

Keywords: gray cast iron; bead mill; surfacing; wear resistance; hydroabrasive wear; powder wire.

Постановка проблеми

Бісерні млини є різновидами млинів, які успішно застосовуються для подрібнення широкого кола матеріалів в багатьох галузях виробництва: харчовій, гірничодобувній, лакофарбовій, керамічній тощо [1, 2]. Отримання ультрадисперсних частинок помелу досягається шляхом додавання суспензії з таким самим хімічним складом і перетирання матеріалу у рідкому середовищі твердими кульками — технічним бісером, якому задається рух за допомогою черв'ячного валу (рис. 1).

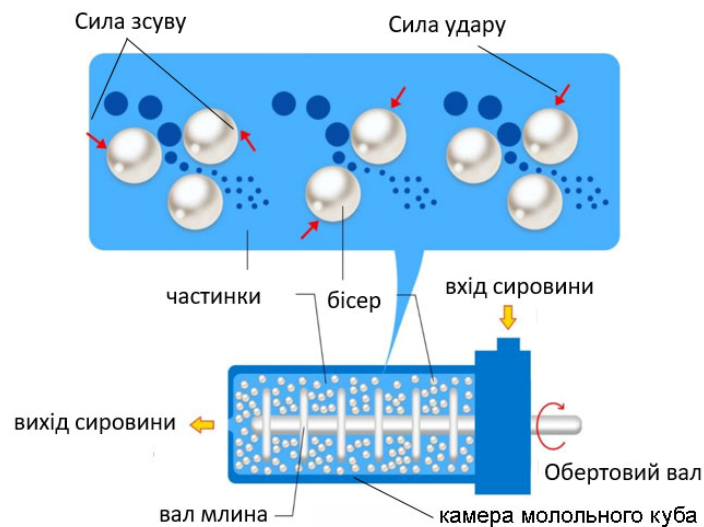


Рис. 1. Принцип подрібнення в бісерному млині [3]

Одним з різновидів бісерних млинів є вертикальний млин, який характеризується вертикальним розташування камери молольного куба, а також є більш простим у виробничому процесі, оскільки уникає проблеми з герметизацією камери та має відносно низьку вартість. До недоліків відносять невисокий помел матеріалів та низьку ефективність подрібнення матеріалів.

У даний час на вітчизняних лакофарбових виробництвах найбільш поширеним є бісерний млин типу МТ-140. Під час його роботи об'єм млинового простору заповнюється бісером на 70...80 %. Також для полегшення процесу розмелювання в камеру заливають суспензію з порошку та лаку, що розмелюється і заповнює весь вільний об'єм між сегментами валу млина. Таким чином, при обертанні валу млина його сегменти направляють подрібнюваний матеріал до виходу та створюють тиск між бісером і своїми поверхнями. За рахунок створеного тиску відбувається подрібнення суспензії до необхідної фракції. Наведений вплив також призводить до інтенсивного зносу робочих поверхонь сегментів млина, що, в свою чергу, негативно впливає на якість вихідного продукту та зумовлює заміну зношених сегментів. На млинах типу МТ-140 заміна сегментів викликає тривалий простій обладнання та відповідні економічні втрати, тому визначення причин інтенсивного зносу робочих поверхонь сегментів млина та підвищення довговічності їх роботи є актуальною задачею.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз умов роботи та характеру зношування робочих поверхонь сегментів бісерного черв'ячного валу, визначення й обґрунтування технології їх відновлення.

Виклад основного матеріалу

Особливістю технологічного процесу бісерного млина типу МТ-140 є вертикальне розташування робочої камери (рис. 2).

За цих умов, при обертанні молольного валу матеріал для подрібнення потрапляє спочатку на дно камери, де найбільша концентрація бісерних елементів великих розмірів (2,9...3,5 мм). Необхідно зазначити, що розмір бісеру є важливим чинником при подрібненні. Зокрема, кульки великих розмірів є достатніми для подрібнення частинок мікронного розміру до субмікронних. Кульки маленьких розмірів подрібнюють частинки субмікронного розміру.

Потрапляючи на дно камери, неподрібнений матеріал складається з частинок великих розмірів, що потребує більш високої енергії удару. Оскільки інтенсивність енергії визначається масою та швидкістю кульок, для подрібнення великих та/або твердих частинок потрібні кульки великих розмірів з високою швидкістю руху. Під впливом сили тяжіння, на дні камери збирається бісер більших розмірів, який і здійснює чорнове подрібнення матеріалу [4]. Після зменшення дисперсності помелу він за допомогою обертового руху сегментів млина піднімається до верхньої частини камери та до виходу.

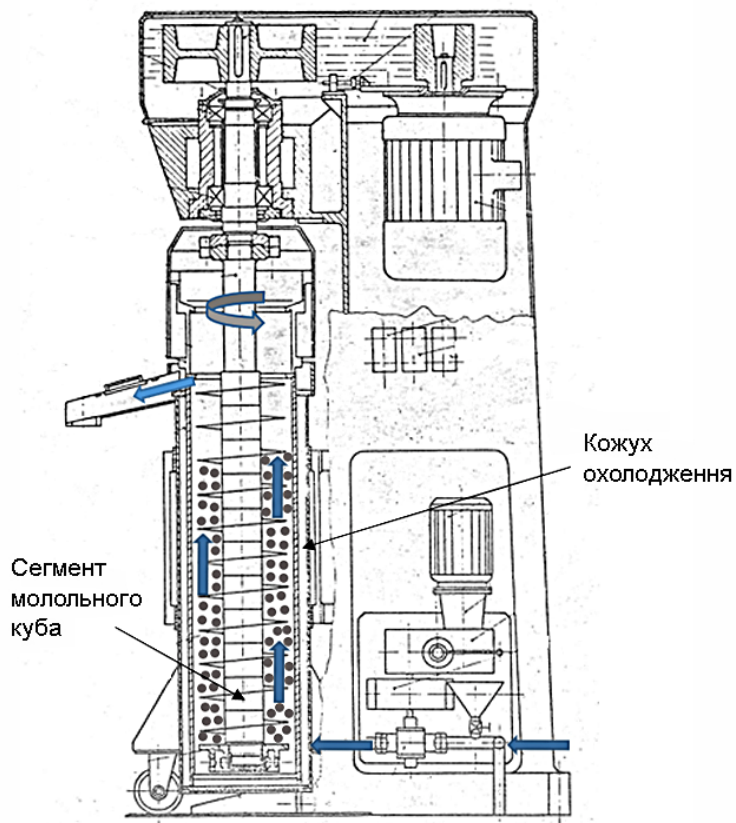


Рис. 2. Схема роботи бісерного млина МТ-140

У процесі роботи млина подрібнюється не тільки матеріал, але зношуються і самі кульки. Набуваючи менших розмірів, вони переважно будуть триматися ближче до середини або розташовуватися у верхній частині камери. Оскільки менша поверхнева площа кульок збільшує частоту удару між ними та частинками подрібнюваних компонентів, підвищується швидкість подрібнення, що призводить до більшого диспергування матеріалу.

З наведеного витікає, що навантаження на сегменти валу млина нерівномірне. Сегменти, які знаходяться в нижній частині камери, піддаються інтенсивному тертю і тому їх робочі поверхні зношуються більше. Так, після визначеного терміну роботи, відносно нового сегмента (рис. 3, а, б) діаметр зменшується з 305 до 295 мм (що складає близько 3%), а його товщина з 15 до 8,4 мм (зменшення близько 45%, див. рис. 3, в, г).



а



б



в



г

Рис. 3. Загальний вигляд нового сегменту (а, б) та після зношування (в, г)

Наведений рівень зношування робочих поверхонь сегментів залежить, в першу чергу, від властивостей пари тертя: складу, структури, властивостей матеріалу млина й бісеру. Сегменти млина відлиті з сірого хромистого чавуну марки ЧХ1 з хімічним складом в межах стандарту. Бісер же має наступний хімічний склад: 55 % SiO_2 , 19.3 % CaO , 13.4 % Al_2O_3 , 6.5 % B_2O_3 , 4.20 % MgO тощо.



Рис. 4. Зношена поверхня сегмента бісерного млина

пу із значним градієнтом значень твердості в межах 150...230 МПа.

Зазначений механізм зносу по висоті молочної камери млина розподіляється нерівномірно. Нижні млини зазнають переважно абразивного зношування через більші розміри бісерних елементів і, відповідно, більшу енергію, направлену на руйнування поверхонь деталей млинів. Кавітаційний механізм зношування переважає в верхній частині камери. Наведений висновок може допомогти при виборі наплавних матеріалів для відновлення зношених поверхонь.

Відомо, що зносостійкість наплавлених шарів в значній мірі залежить від їх хімічного складу. Так, збільшення вмісту вуглецю підвищує твердість сплаву, особливо за застосування термічної обробки, проте вважається, що основну роль в опорі поверхонь зношуванню відіграють карбіди, як найбільш тверді структурні складові сплаву [5, 6]. Утворенню карбідів сприяє додавання до сплаву марганцю, кремнію, хрому. Вміст карбідів підвищується також зі збільшенням концентрації вуглецю.

З іншого боку, для верхніх сегментів наплавлений шар повинен мати підвищену корозійну стійкість, яка переважно забезпечується підвищеним вмістом хрому (не менше 12 %) та нікелю.

Враховуючи високу зносостійкість матеріалу, з якого виготовлений сегмент, а також ступінь втрати лінійних розмірів та форми, можливі наступні варіанти відновлення деталей [7—10]:

- ручне або механізоване дугове наплавлення;
- електроконтактне наплавлення;
- метод напилення.

Для випадку реновації в умовах профільного підприємства варто віддати перевагу електродуговим технологіям, як найбільш адаптованим для широкого використання [11, 12].

Традиційним для відновлення зношених поверхонь деталей, які працюють при абразивному та гідроабразивному зношуванні, є застосування сплавів із значною кількістю дорогих легуючих елементів (нікель, молібден, вольфрам, мідь, ванадій тощо [13—15]). Проте, останнім часом більшої популярності набули економно леговані високохромисті та хромомарганцеві чавуни. До недоліків застосування наведених сплавів відносять невисокі зносостійкі та механічні властивості, здатність утворювати тріщини під час кристалізації і термічної обробки [16].

За наведеним хімічним складом можливо зробити висновок, що бісер є абразивним елементом для поверхонь чавунних сегментів та відбувається абразивне зношування останніх. З іншого боку, на робочі поверхні чинить вплив технологічна суспензія, що спричиняє виникнення ефекту кавітаційного зношування, яке полягає в утворенні заглиблень на поверхні після багаторазових повторюваних ударів рідини. Таким чином, в даному випадку реалізується комбінований механізм гідроабразивного зносу, результати дії якого можливо спостерігати на зношеній поверхні (рис. 4).

Хвилястість контактної поверхні сегменту пояснюється, передовсім, дією різних за розмірами та формою кульок бісеру, що з різною енергією впливають на поверхню сегментів, та, цим самим, утворюють шар накле-

Наведені вище особливості зношування сегментів дають підставу рекомендувати в якості матеріалів для відновлення порошкової дроти, що забезпечують підвищену опірність як до абразивного, так і до гідроабразивного зносу (див. табл. 1).

Таблиця 1. Типові хімічний склад та твердість наплавленого металу рекомендованих порошкових дротів

Марка дроту	Типовий хімічний склад наплавленого металу, %							Твердість наплавленого металу, HRC
	C	Mn	Si	Cr	Nb	Ni	Fe	
SK A43-O	5,6	0,2	1,3	20,2	6,7	–	основа	64
ВЕЛТЕК-Н462	0,3	0,6	0,6	13	–	–	основа	47–54
ВЕЛТЕК-Н479	3,5	0,4	1,5	32	–	4	основа	48–54
ВЕЛТЕК-Н590	0,5	0,5	2,6	8,5	–	–	основа	55–61

Як вбачається, наявність у складі наплавлених шарів *Cr*, *Mn* та *Si* повинно сприяти додатковій металургійній обробці (зважаючи на матеріал основи, сірий чавун), належній твердості та стійкості до корозійних проявів. Крім того, вибір — як альтернатива — складів із зменшеним вмістом вуглецю виглядає цікавим з точки зору уникнення тріщин та можливості зменшення вимог до температури попереднього підігріву заготовок перед наплавленням.

Досить непогана якість при відновленні поверхонь, які працюють за значних абразивних впливів, забезпечується порошковим дротом марки SK A43-O. Наплавлені шари такого сплаву зберігають свої механічні властивості при робочих температурах до 450 °С. До особливостей отриманих шарів також можна віднести прогнозовану структуру сплаву, яка складається з аустенітної матриці й карбідів ніобію, чим пояснюється досить високе значення твердості.

Слід додати, що після наплавлення потрібною буде механічна обробка поверхні для досягнення нормативних значень розмірів, форми та шорсткості. Очікується, що виконання запропонованих заходів дозволить знизити вартість відновлення та збільшити міжремонтний період експлуатації агрегату.

Додаткові дослідження впливу системи легування, мікролегування та параметрів технологічних процесів відновлення робочих поверхонь на підвищення експлуатаційних характеристик деталей залишаються актуальними.

Висновки

1. Проведено аналіз умов роботи сегментів бісерного черв'ячного валу та встановлено механізм зносу їх робочих поверхонь, що змінюється від переважно гідроабразивного для розташованих уверху камери до майже чисто абразивного для розміщених нижче. Це визначає критерії вибору наплавних матеріалів для відновлення зношених деталей.

2. Характер та ступень втрати розмірів і форми сегментів внаслідок зносу залежить, у тому числі, від діаметра кульок бісеру, який визначає хвилястість контактної поверхні сегменту та градієнт значень твердості внаслідок наклепу.

3. Для уточнення впливу хімічного складу наплавленого металу на механічні властивості відновленого шару запропоновано використовувати порошкові дроти з різним вмістом, в першу чергу, вуглецю та хрому, що дозволить оцінити опірність контактних поверхонь як до абразивного, так і до гідроабразивного зносу.

Список використаної літератури

- Ogi T., Zuhijah R., Iwaki T., Okuyama K. Recent progress in nanoparticle dispersion using bead mill. *KONA Powder and Particle Journal*. 2017. Volume 34. pp. 3–23. DOI: <https://doi.org/10.14356/kona.2017004>
- Tanaka H., Ochi Y., Moroto Y., Ibaraki T., Ogawara K. Development of novel bead milling technology with less metal contamination by pH optimization of the suspension medium. *Chemical*

- and Pharmaceutical Bulletin*. 2021. Volume 69. Issue 1. pp. 81–85. DOI: <https://doi.org/10.1248/cpb.c20-00623>
3. Сайт компанії «Shanghai ELE Mechanical and Electrical Equipment Co. Ltd» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ele-mix.com>.
 4. Дейнега Р.О., Чумаченко Я.В., Фафлей О.Я., Мельник В.О., Михайлюк В.В., Яценко Д. О. Особливості дослідження зношування елементів фонтанних арматур методом імітаційного моделювання. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2020. №1 (74). С. 45–52. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-1\(74\)-45-52](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-1(74)-45-52)
 5. Федоров Г.Є., Ямшинський М.М., Платонов Є.О., Кузьменко А.Ю., Радченко К.С. Підвищення гідроабразивної зносостійкості високолегованого білого чавуну. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2009. № 1. С. 95–99.
 6. Брыков М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное издание. Херсон: Гринь Д.С., 2014. 364 с. ISBN 978-617-7243-19-8.
 7. Спеціальні способи зварювання: підручник / за заг. редакцією акад. НАНУ Б. Є. Патона. Миколаїв : НУК, 2017. 346 с.
 8. Welding, brazing, coating and wear plate solutions [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.castolin.com>
 9. Зварювання та наплавлення чавунів: навч. посіб. / В. М. Палаш, Р. В. Палаш. Львів: Бадікова Н. О., 2017. 176 с. ISBN 978-617-7448-13-5
 10. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. К.: Екотехнологія, 2013. 400 с. ISBN 978-966-8409-31-8.
 11. El-Banna E.M, Nageda M.S, El-Saadat M.M. Study of restoration by welding of pearlitic ductile cast iron. *Materials Letters*. 2000. Volume 42. Issue 5. Pp. 311-320. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(99\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(99)00204-9).
 12. Methodology of technical design in the restoration of parts/ Permyakov, A., Nemyrovskiy, Y., Posviatenko, E., Shepelenko, I. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering; Bristol. Volume 1277, Issue 1 (Mar 2023), № 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1277/1/012013>
 13. Кіндрачук М.В., Куцова В.З., Ковзель М.А., Тісов О.В. Сучасні функціональні матеріали з бейнітною наноструктурною матрицею та підвищеними трибологічними властивостями. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. №1 (70). С. 112–130.
 14. Koriuchev N., Kovtun O., Shehovsov D., Tkalenko I. Repair of Worn-Out Parts of Auger Presses by Surfacing Method. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2023. Volume 8. Issue 4 (Jul. 2023). Pp. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejeng.2023.8.4.3072>
 15. Похмурський В.І., Студент М.М., Довгуник В.М. Електродугові відновні та захисні покриття. Львів: Львівська політехніка, 2005. 190 с.
 16. Калін М.А. Нові матеріали і технології для зварювання чавуну: Монографія. Горлівка: Ліхтар, 2009. 85 с. ISBN 978-966-2129-35-9

FEATURES OF WEAR AND PROSPECTS FOR RESTORATION OF THE WORM AUGER SEGMENT OF A BEAD MILL

Abstract

One of the most common problems of bead mills is the intensive wear of their working grinding segments, which negatively affects the quality of the crushed material and causes long-term downtime of the equipment, and, as a result, economic losses. Taking into account the identified problem, the purpose of the study is to analyze the working conditions and the nature of wear of the working surfaces of the segments of the bead worm shaft and justify the technology of their restoration. It was established that the main wear of the contact surfaces of the cast iron segments (ChKh1) is caused by their friction with the beads, which according to their chemical composition (55 % SiO_2 , 19.3 % CaO , 13.4 % Al_2O_3 , 6.5 % B_2O_3 , 4.2 % MgO) and hardness are an abrasive element relative to wearing sur-

faces. The nature and degree of loss of size and shape of the segments due to wear depends, among other things, on the diameter of the bead balls, which determines the waviness of the contact surface of the segment and the gradient of hardness values due to defatation. On the other hand, the working surfaces are affected by the technological suspension, which causes the appearance of the effect of cavitation wear, which consists in the formation of indentations on the surface after multiple repeated blows of the liquid. The conducted analysis of the operating conditions of the segments established a combined hydroabrasive wear mechanism of their working surfaces, which is explained by the simultaneous effect of abrasive bead elements and technological suspension. The nature of the intensity of the mentioned wear mechanism is uneven along the height of the worm screw, from mainly hydroabrasive for the upper segments to almost purely abrasive for the lower segments. Taking into account the determined mechanism of wear, it is proposed to restore the working surfaces of the segments by electric arc surfacing, and powder-coated wires of different chemical composition are used as surfacing materials. To clarify the influence of the chemical composition of the deposited metal on the mechanical properties of the restored layer, it is proposed to use powder-coated wires with different contents, primarily of carbon and chromium, which will allow to evaluate the resistance of the contact surfaces to both abrasive and hydroabrasive wear.

References

- [1] Ogi, T., Zuhlajah, R., Iwaki, T., & Okuyama, K. (2017). Recent progress in nanoparticle dispersion using bead mill. *KONA Powder and Particle Journal*, 34, 3–23.
- [2] Tanaka, H., Ochii, Y., Moroto, Y., Ibaraki, T., & Ogawara K. (2021). Development of novel bead milling technology with less metal contamination by pH optimization of the suspension medium. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 69(1), 81–85.
- [3] Site of the company «Shanghai ELE Mechanical and Electrical Equipment Co. Ltd». Retrieved from: <https://www.ele-mix.com>.
- [4] Deyneha, R.O., Chumachenko, YA.V., Fafley, O.YA., Mel'nyk, V.O., Mykhaylyuk, V.V., & Yashchenko, D. O. (2020). Osoblyvosti doslidzhennya znoshuvannya elementiv fontannykh armatur metodom imitatsiynoho modelyuvannya [Peculiarities of the study of the wear of elements of fountain fittings by the method of simulation modeling]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 1(74), 45–52. [in Ukrainian].
- [5] Fedorov, H.YE., Yamshyns'kyi, M.M., Platonov, YE.O., Kuz'menko, A.YU., & Radchenko, K.S. Pidvyshchennya hidroabrazivnoyi znosostiykosti vysokolehovanoho biloho chavunu [Increasing the hydroabrasive wear resistance of highly alloyed white cast iron]. *Naukovi visti NTUU «KPI» – Scientific news of NTUU "KPI"*, 1, 95-99.
- [6] Brykov, M.N., Yefremenko, V.G., & Yefremenko, A.V. (2014). *Iznosostoykost' staley i chugunov pri abrazivnom iznashivanii: nauchnoye izdaniye [Wear resistance of steels and cast irons during abrasive wear: scientific publication]*. Kherson: Grin [in Russian].
- [7] Paton, B.E. (Eds.) (2017). *Spetsial'ni sposoby zvaryuvannya [Special methods of welding]*. Mykolaiv: NUK [in Ukrainian].
- [8] Welding, brazing, coating and wear plate solutions. Retrieved from: <http://www.castolin.com>
- [9] Palash, V.M., & Palash, R.V. (2017). *Zvaryuvannya ta naplavlennya chavuniv [Welding and surfacing of cast iron]*. Lviv: Badikova N.O. [in Ukrainian].
- [10] Ryabtsev, I.A., & Senchenkov, I.K. (2013). *Teoriya i praktika naplavochnykh robot [Theory and practice of surfacing works]*. Kyiv: Ecotechnology [in Russian].
- [11] El-Banna, E.M, Nageda, M.S, & El-Saadat, M.M. (2000). Study of restoration by welding of pearlitic ductile cast iron. *Materials Letters*, 42(5), 311-320.
- [12] Permyakov, A., Nemyrovskiy, Y., Posviatenko, E., & Shepelenko, I. (2023). Methodology of technical design in the restoration of parts. Proceedings from IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. (Vol. 1277, 1). (№ 012013). Bristol.
- [13] Kindrachuk, M.V., Kutsova, V.Z., Kovzel', M.A., & Tisov, O.V. (2016). Suchasni funktsional'ni materialy z beynitnoyu nanostrukturnoyu matrytseyu ta pidvyshchenymy trybolohichnymy vlastyvostyamy [Modern functional materials with a bainite nanostructured matrix and increased

- tribological properties]. *Problemy tertya ta znoshuvannya – Friction and wear problems*, 1(70), 112–130.
- [14] Koriuchev, N., Kovtun, O., Shehovsov, D., & Tkalenko, I. (2023). Repair of Worn-Out Parts of Auger Presses by Surfacing Method. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 8(4), 12–16.
- [15] Pokhmurs'kyu, V.I., Student, M.M., & Dovhunya, V.M. (2005). *Elektroduhovi vidnovni ta zakhysni pokryttya [Electric arc restorative and protective coatings]*. Lviv: Lviv Polytechnic [in Ukrainian].
- [16] Kalin, M.A. (2009). *Novi materialy i tekhnolohiyi dlya zvaryuvannya chavunu [New materials and technologies for welding cast iron]*. Horlivka: Likhtar. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 26.04.2024