

УДК 621.891

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.50.954

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ МЕТАСТАБІЛЬНИХ ТА ВТОРИННОТВЕРДІЮЧИХ СТАЛЕЙ

ГЛУШКОВА Д. Б.<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, проф.,

БАГРОВ В. А.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ВОЛЧУК В. М.<sup>3</sup>, докт. техн. наук, проф.

<sup>1\*</sup> Кафедра металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

<sup>2</sup> Кафедра металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0003-0728-1290

<sup>3</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

**Анотація.** *Вступ.* Розглянуто питання впливу зносу на утворення «білої смуги» у метастабільних аустенітних, мартенситно-аустенітних та вториннотвердіючих сталях системи Cr–Mn–Ti, додатково легованих Mo, V, V. Показано вплив структури та фазового складу на зносостійкість економнолегованих метастабільних та вториннотвердіючих сталей. *Виклад основного матеріалу.* Наплавлення досліджуваних матеріалів проводилося в мідні форми з різною швидкістю примусового охолодження. Досліджувалися метастабільні аустенітні, мартенситно-аустенітні та вториннотвердіючі сталі системи Cr–Mn–Ti додатково леговані Mo, V, V. Додаткове легування цих сталей титаном у кількості 2...5 % сприяло запобіганню сколам по зоні сплавлення. Поблизу лінії сплаву міститься зона основного металу шириною 7...15 мкм. Після випробування за об'ємної температури робочої частини зразка  $T_v = 553...573$  К у контактних об'ємах наплавленого металу типу 30X2B8Ф виявлено розширення меж зерен, лінії зсуву, більш дрібне порівняно з нижчими шарами зерно. Поза зоною пластичної деформації величина зерен відповідає їх розмірам до початку випробувань, межі зерен відносно тонкі. Кількість та розташування спостерігаються при збільшеннях X430, X800 карбідів також аналогічні структурним характеристикам наплавленого металу типу 30X2B8Ф. При близьких значеннях контактного тиску в парі тертя – час утворення тріщини критичної довжини зростає зі збільшенням ефективної поверхневої енергії  $\gamma_e$  (що включає енергію пластичної деформації). *Висновки.* Проведені дослідження підтверджують можливість утворення «білої смуги» як у сплавах, що мають високу концентрацію елементів-аустенізаторів (Mn, C, Ni), так і при легуванні карбідотвірними елементами з відносно невисокою спорідненістю до вуглецю (V, Mo). Показники тріщиностійкості (КС,  $j$ -інтеграл,  $\delta_C$ ) а отже, і опір зношування мартенситностаріючих сталей вищі, ніж метастабільних та інструментальних сталей.

**Ключові слова:** сталь; легування; структура; фазовий склад; твердість; тріщиностійкість

## STUDY OF THE EFFECT OF STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION ON THE WEAR RESISTANCE OF SPARINGLY ALLOYED METASTABLE AND SECONDARY HARDENING STEELS

HLUSHKOVA D.B.<sup>1\*</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

BAGROV V.A.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

VOLCHUK V.M.<sup>3</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

<sup>1\*</sup> Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho Str., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

<sup>2</sup> Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho Str., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0003-0728-1290

<sup>3</sup> Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

**Abstract. Introduction.** The paper considers the influence of wear on the formation of a “white band” in metastable austenitic, martensitic-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system additionally alloyed with Mo, B, V. The influence of the structure and phase composition on the wear resistance of sparing. **Results.** Surfacing of the studied materials was carried out in copper molds with different rates of forced cooling. Metastable austenitic, martensitic-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system additionally alloyed with Mo, B, V were studied. Additional alloying of these steels with titanium in an amount of 2...5 % contributed to the prevention of spalling along the fusion zone. Near the fusion line there is a base metal zone with a width of 7...15  $\mu\text{m}$ . After testing at the volume temperature of the working part of the specimen  $T_V = 553...573 \text{ K}$  in the contact volumes of the deposited metal of the 30Kh2V8F type, broadening of the grain boundaries, shear lines, finer grains compared to the underlying layers were revealed. Outside the zone of plastic deformation, the size of the grains corresponds to their sizes before the start of testing, the grain boundaries are relatively thin. The number and location of carbides observed at X430, X800 magnifications are also similar to the structural characteristics of the deposited metal of the 30Kh2V8F type. At close values of the contact pressure in the friction pair, the time of formation of a crack of critical length increases with an increase in the effective surface energy  $\gamma_e$  (including the energy of plastic deformation). Thus, the crack resistance indices (CR, j-integral,  $\delta_c$ ) and, consequently, the wear resistance of maraging steels are higher than those of metastable and tool steels. **Conclusions.** The conducted studies confirm the possibility of the formation of a “white band” both in alloys with a high concentration of elements – austenitizers (Mn, C, Ni), and when alloyed with carbide-forming elements with a relatively low affinity for carbon (V, Mo). The crack resistance indices (CR, j-integral,  $\delta_c$ ) and, consequently, the wear resistance of maraging steels is higher than those of metastable and tool steels.

**Keywords:** steel; alloying; structure; phase composition; hardness; crack resistance

**Вступ.** Дослідження, спрямовані на розроблення вдосконалення економно-легованих сталевих зносостійких сталей для наплавлення інструменту гарячої обробки металу, дуже актуальні [1–5].

Інструмент гарячої обробки металу призначений для виконання основної операції – пластичної деформації металу за високих температур [6–9]. Для високопродуктивної роботи цей інструмент повинен володіти достатньою твердістю, опором стиску, вигину, динамічним навантаженням, високим опором стирання та ударно-абразивному зношуванню, теплостійкістю, мати добре оброблену поверхню робочих частин [10; 11].

Один із факторів, що впливають на довговічність інструменту гарячого деформування, – це температура [12–17]. Вплив температури пов'язаний з такими явищами, що відбуваються в поверхневому та підповерхневому шарах [18–25]:

- зміна показників механічних властивостей за зростання температури;
- відпуском та структурними перетвореннями;
- появою вторинних деформацій та напруг, спричинених нерівномірністю розподілу температур.

Мета роботи – дослідження впливу структури та фазового складу на зносостійкість економнолегованих метастабільних та вториннотвердіючих сталей.

**Виклад основного матеріалу.** Наплавлення досліджуваних матеріалів проводилося в мідні форми з різною швидкістю примусового охолодження. Досліджувалися метастабільні аустенітні, мартенситноаустенітні та вториннотвердіючі сталі системи Cr–Mn–Ti додатково леговані Mo, B, V.

Випробування на зношування проводили відповідно до вимог Держстандарту 30480-97 «Забезпечення зносостійкості виробів. Методи випробування на зносостійкість. Загальні вимоги».

Для випробування використовували машину тертя 2070 СМТ-1, схема випробування – диск-колодка. Режими тертя: швидкість обертання диска 0,5 м/с; навантаження на зразок 25, 50 Н; матеріал контртіла – сталь 45Х, НRC 47...49.

Також досліджували зношування наплавленого металу в умовах торцевого тертя про плоскі стрижні зі сталей P18, 12X18H9T та ін. при поворотно-

поступальному русі. Температуру нагріву зразків та стрижнів тертя заміряли хромель-алюмелевими термопарами діаметром 0,2 мм на приладі за швидкості протягу стрічки 2160 мм/хв.

Обробку результатів проводили з урахуванням [1–5] за виразами для пружнопластичного та пластичного контактів:

Контурний тиск:

$$P_c = \frac{5,4}{E^4} \cdot \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{\Delta^2}; \quad (1)$$

$$P_c \geq 1,45 \frac{1}{\Delta^2} \cdot \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{E^4}. \quad (2)$$

Наближення:

$$\varepsilon = 0,125 \left( 8 \frac{P_c}{HB} + 1 \right). \quad (3)$$

У зв'язку з істотним впливом нагріву на локальну зміну форми контактуючих поверхонь тіл і структурні перетворення використовували термоконтактний критерій для осесиметричного контакту [2]:

$$\frac{\pi}{4A} \cdot \frac{f[(1+\nu_1) \cdot \alpha_1 + (1+\nu_2) \cdot \alpha_2]}{\lambda + \lambda_2} \cdot \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \cdot \omega R_{np}^2 \cdot \sigma_n^2, \quad (4)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $A$  – механічний еквівалент теплоти;  $\nu_1, \nu_2$  – коефіцієнти Пуассона;  $\alpha_1, \alpha_2$  – термічні коефіцієнти лінійного розширення;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності;  $E_1, E_2$  – модулі пружності матеріалів;  $\sigma_n$  – максимальний тиск за Герцем;  $\omega$  – відносна кутова швидкість;  $R_{np}$  – наведений радіус кривизни.

Визначали як масовий, і лінійний знос. Для зносостійких сталей з бейнітною, бейнітно-мартенситною та метастабільною аустенітною структурою основним матеріалом – еталоном приймався наплавлений метал 30X2B8Ф.

Пластичність поверхневого шару наплавленого металу та інструментальних термооброблених сталей оцінювали за значеннями усередненого відносного подовження:

$$\delta_B = \frac{\delta_{max} + \delta_{min}}{2}, \quad (5)$$

де

$$\delta_{max} = \frac{0,08(h/d - 0,13)}{0,264 - h/d - 1,08(h/d^2)}; \quad (6)$$

$$\delta_{min} = \frac{0,75(h/d - 0,13)^2}{0,224 - h/d - 1,08(h/d)^2}, \quad (7)$$

де  $h$  і  $d$  – відповідно глибина застосування індентора та діаметр відбитка під час вимірювань твердості.

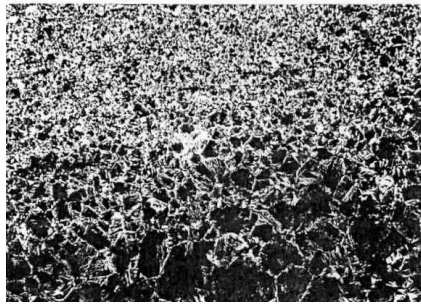
Теплостійкість визначали залежностями. Зразки нагрівали до температур 900, 925, 950, 970 і 1 000 К, витримка – 4 години з охолодженням і вимірюванням твердості.

За характеристики термостійкості приймалося число циклів  $NP$  до руйнування зразків у поперечному перерізі.

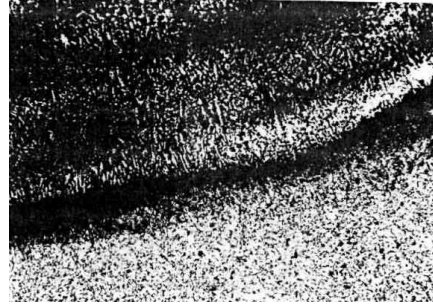
Дослідження первинної структури шліфів наплавлених сталей показало наявність білих прошарків, що погано травляться, незначно відрізняються по ширині (рис. 1, 2).

Металографічний аналіз розташування прошарків показав, що у більшості випадків воно повторює фронт кристалізації наплавленого металу.

Зіставлення розрахункових та експериментальних величин інтенсивності зношування показало, що розрахункові значення інтенсивності зношування можна використовувати для орієнтовного оцінювання зносостійкості сплавів різного хімічного складу, але близьких за структурним класом. Відповідно до теорії втомного зношування руйнування поверхневих шарів при зовнішньому терті зумовлене знакозмінними напругами [1; 5]. У деяких випадках за нормальних напруг, що відповідають пружним деформаціям, пластичне протягом поверхневих шарів викликається дотичними напругами. У разі пластичного контакту навантаження, що веде до пластичної течії, істотно залежить від молекулярної складової коефіцієнта тертя.

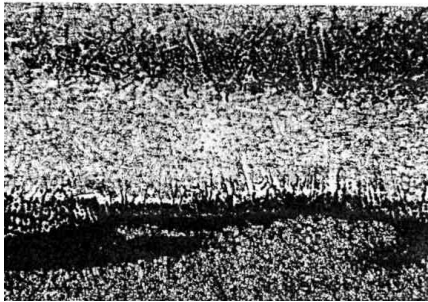


20X3Г9М5Т2С

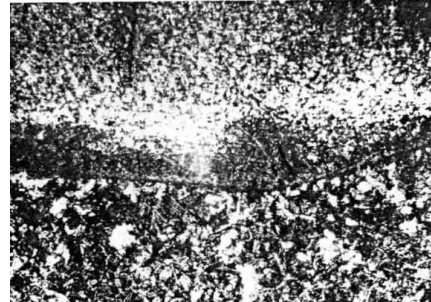


40Х4Г9Т2С

Рис. 1. Структура зони сплавлення. Поперечний темплет,  $\times 100$



20X3Г9М5Т2С



40Х4Г9Т2С

Рис. 2. Структура зони сплавлення. Поздовжній темплет,  $\times 100$

Для всіх досліджених сплавів характерне поступове зменшення розкиду значень мікротвердості за глибиною зони тертя.

Зміни мікротвердості у приповерхневих шарах на стадії зношування зумовлено паралельно відбуваються процесами взаємної дифузії матеріалів пар тертя, вибіркового окиснення і термодифузійного перерозподілу зміцнювальної фази за дії температур і деформацій [26–32].

Перелічені зміни мають різний вплив на інтенсивність зношування досліджених матеріалів. Низька здатність до зміцнення інструментальних сталей спричинює підвищення темпу зношування та передчасний перехід до стадії критичного зношення. Двійникування та виділення карбідів по двійниках у метастабільних аустенітних і вториннотвердіючих сталей підвищує опірність пластичним зсувам за підвищених температур, ускладнюючи руйнування робочих поверхонь під час тертя

[1–5]. Інтенсивність зношування деяких досліджених сталей наведено на рисунку 3.

Після випробування за об'ємної температури робочої частини зразка  $T_v = 553...573$  К До контактних об'ємах наплавленого металу типу 30X2B8Ф виявлено розширення меж зерен, лінії зсуву, більш дрібне порівняно з нижчими шарами зерно. Поза зоною пластичної деформації величина зерен відповідає їх розмірам до початку випробувань, межі зерен відносно тонкі.

Кількість та розташування спостерігаються при збільшеннях X430, X800 карбідів також аналогічні структурним характеристикам наплавленого металу типу 30X2B8Ф. Структура, що формується біля фронту зношування, подібна до структури білої зони будовою і характеризується високою мікротвердістю.

Характерні зміни структури наплавленого металу в контактній зоні і шарах, що лежать нижче, показані на рисунку 4.

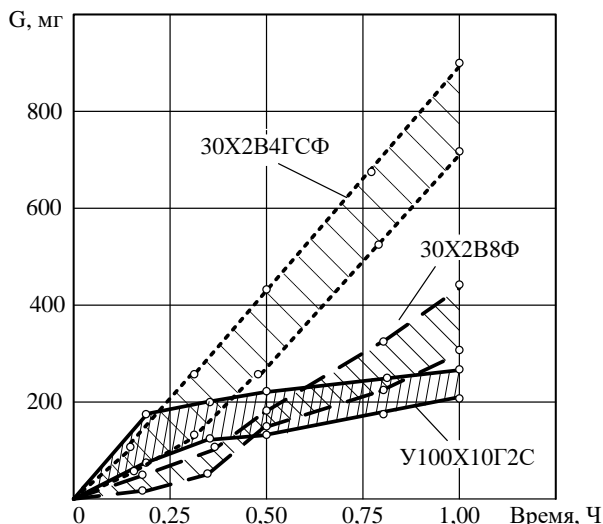


Рис. 3. Інтенсивність зношування наплавленого металу. Параметри режиму:  $T_{CM} = 773 \text{ K}$ ,  $P_A = 20 \text{ МПа}$ ,  $V_{В.П.Л.} = 0,188 \text{ м/с}$ , матеріал стрижня тертя–сталь Р18. Початкова кількість аустеніту у структурі сплавів, що випробовуються: 30X2B8Ф – 5..7 %; 30X2B4ГСФ – 15 %; У100Х10Г2С – 95...97 %



Рис. 4. Структура наплавленого металу після випробувань на зношування:  
а – біля поверхні; б – 2 мм від поверхні зношування

Із підвищенням температури стрижня тертя до  $T_{CT} = 823 \text{ K}$  мікротвердість металу контактних обсягів помітно знизилася. Для граничного шару характерна структура «білої зони» після високого відпуску.

В окремих зразках із хромомолібденового наплавленого металу виявлено порушення суцільності за межами зерен.

Структура відпущеного металу «білої смуги» наплавлення 50X5M2B2H1Ф змінюється у поверхні зношування продуктами відпуску з ділянками аустеніту за підвищення температури стрижня тертя від 823 K до 973 K.

При близьких значеннях контактного тиску в парі тертя час утворення тріщини

критичної довжини зростає зі збільшенням ефективної поверхневої енергії  $\gamma_e$  (що включає енергію пластичної деформації).

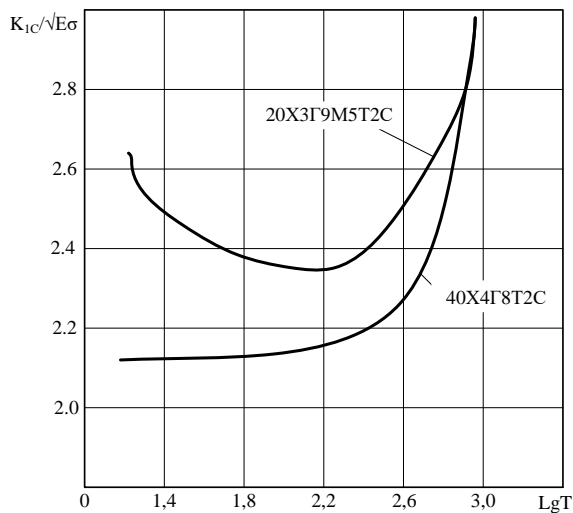


Рис. 5. Залежність розрахунково-експериментального критерію руйнування  $K_{1C} = \sqrt{AEGT\epsilon\alpha\beta}$  від температури

Вплив температури на в'язкість руйнування показано на рисунку 5.

Таким чином, показники тріщиностійкості (КС, j-інтеграл,  $\delta C$ ) а отже, й опір зношування, мартенситностаріючих сталей вищі, ніж метастабільних та інструментальних сталей.

#### Висновки.

1. Проведені дослідження підтверджують можливість утворення «білої смуги» як у сплавах, що мають високу концентрацію елементів-аустенізаторів (Mn, C, Ni), так і за легування карбідотвірними елементами з відносно невисокою спорідненістю до вуглецю (V, Mo).

2. Показники тріщиностійкості (КС, j-інтеграл,  $\delta c$ ), а отже, й опір зношуванню, мартенситностаріючих сталей вищі, ніж метастабільних та інструментальних сталей.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глушкова Д. Б. Зміцнення та відновлення деталей циліндро-поршневої групи. Харків, 2021. 200 с.
2. Hlushkova D., Kalinin V., Stepanyuk A., Hnatyuk A., Serzhenko I. Studying the properties of steel for sidewalls of chute conveyors. *International Science Group*. Boston : Primedia eLaunch, 2021. 758 p. DOI- 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II.
3. Глушкова Д. Б., Багров В. А. Застосування сучасних технологій для підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу : кол. моногр. Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2022. Pp. 171–178.
4. Глушкова Д. Б., Рижков Ю. В., Байдала В. Ю. Наукові та технологічні основи підвищення трибологічних характеристик деталей мехатронних систем. Харків, 2022. 119 с.
5. Глушкова Д. Б. Підвищення надійності робочих органів гідрофікованих машин спеціального призначення: монографія. Дніпро : Журфонд, 2023. 258 с.
6. Gluskova D., Volchuk V. Determination of the optimal parameters of laser boriding to improve the wear resistance of piston rings. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. № 2. 2022. С. 29–32.
7. Глушкова Д. Б., Калініна Н. Є., Демченко С. В., Носова Т. В. Підвищення корозійної стійкості зварних з'єднань в результаті термічної обробки. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 1. С. 21–28.
8. Калініна Н. Є., Глушкова Д. Б., Цокур Н. І., Носова Т. В., Багров В. А., Демченко С. В. Обґрунтування вибору скандію для мікролегування високоміцних алюмінієвих сплавів. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022. № 4. Вип. 2 (182). С. 114–118.
9. Багров В. А., Глушкова Д. Б. Формування структури та фазового складу зносостійких сталей, легованих титаном. *Вісник ХНАДУ*. 2022. Вип. 97. С. 30–33.
10. Багров В. А., Глушкова Д. Б. Властивості зносостійких безнікелевих вториннотвердіючих сталей для наплавлення штампів гарячого оброблення металів. *Вісник ХНАДУ*. 2022. Вип. 97. С. 34–37.
11. Глушкова Д. Б., Багров В. А., Демченко С. В., Волчук В. М., Калінін О. В., Калініна Н. Є. Структура й властивості порошкових газоплазменних покриттів на основі нікелю. *Вісник ХНАДУ*. 2022. Вип. 97. С. 74–81.
12. Большаков В. І., Калінін О. В., Глушкова Д. Б., Тохтарь Г. І., Багров В. А., Гнатюк А. А. Способи отримання дисперсної структури та підвищення міцності кремній – марганцевистих сталей. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 7–12.
13. Глушкова Д. Б., Багров В. А. Дослідження властивостей поверхневих шарів поршневих кілець після газотермічного наплення. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 8–22.
14. Глушкова Д. Б., Багров В. А. Удосконалення технологічного процесу підвищення довговічності робочого інструмента гідромолотів детонаційним напленням. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 39–46.
15. Глушкова Д. Б., Аврунін Г. А., Рижков Ю. В., Воронков О. І., Степанюк А. І., Гнатюк А. А. Підвищення зносостійкості вузлів об'ємного гідропривода. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 80–84.

16. Kalinina N. E., Hlushkova D. B., Dzhur Y. O., Khodyrev S. Ya., Kalinin V. T. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welding joints. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2020. № 28 (1). Pp. 34–41.
17. Kalinina N. E., Hlushkova D. B., Voronkov A. I., Sanin A. F., Kalinin V. T., Nosova T. V., Bondarenko O. V. Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions. *Functional materials*. 2020. Vol. 27, № 3. Pp. 508–512.
18. Dudukalov Y., Ternyuk M., Hlushkova D. Synthesis of the fuel systems boron-containing metalized fuels for vehicles. *SAE Technical Paper 2020-01-2155*. 2020. P. 6.
19. Leontiev D., Voronkov O., Korohodskiy V., Hlushkova D., Nikitchenko I. Mathematical modeling of operating processes in the pneumatic engine of the car. *SAE Technical Paper 2020-01-2222*. 2020. P. 6.
20. Hlushkova D., Bagrov V., Stepaniuk A., Hrinchenko E. D., Hnatiuk A. A., Kalinina N. E., Kalinin V. T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. Corrosion resistance of reinforced layers of 15X11MΦ steel steam turbine blades. *BAHT*. 2021. № 2 (132). С. 136–141.
21. Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M., Antoszewski B., Kundera Cz., Konopiianchenko Ie., Tarelnik N., Hudkov S., Zahorulko A. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible machine flexible coupling. Part 1. Analysis of the reasons affecting fretting resistance of flexible elements from expansion coupling. *Journal of Physics : Conference Series*. 2021. № 1741. 11 p.
22. Hlushkova D., Voronkov A., Kalinina N., Kalinin V., Polonskyi L., Stepaniuk A. Structural and phase composition features of titanium and chromium nitride coatings obtained by ion-plasma deposition. *Functional Materials*. 2020. Vol. 27, № 4. Pp. 710–715.
23. Hlushkova D. B., Kirichenko I. H., Bahrov V. A., Kalinina N. Ye., Nosova T. V. Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts. *PAST*. 2021. № 5 (135). Pp. 139–145.
24. Bolshakov V. I., Kalinin A. V., Hlushkova D. B., Ryzhkov Y. V., Bagrov V. A. Transformation of structure and properties of structural steel during nanomodification and strengthening treatment. *Functional materials*. 2021. Vol. 28, № 3. Pp. 486–491.
25. Bolshakov V. I., Kalinin O. I., Kalinina N. E., Hlushkova D. B., Voronkov O. I., Ryzhkov Y. V., Stepanyuk A. I. Increasing the corrosion resistance of welded joints of heat-resistant nickel alloy with steel. *BAHT*. 2022. № 1 (37). Pp. 195–198.
26. Hlushkova D. B., Voronkov O. I., Ryzhkov Y. V., Kalinin N. E., Nosova T. V. Peculiarities of the formation of a hardened layer during laser boronizing of piston rings. *BAHT*. 2022. № 1 (37). Pp. 199–201.
27. Vahrusheva V. S., Hlushkova D. B., Volchuk V. M., Nosova T. V., Mamhur S. I., Tsokur N. I., Bagrov V. A., Demchenko S. V., Ryzhkov Y. V., Scrypnikov V. O. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. *BAHT*. 2022. № 4 (140). Pp. 137–140.
28. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Demchenko S. V., Volchuk V. M., Kalinin O. V., Kalinina N. E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *BAHT*. 2022. № 4 (140). Pp. 125–130.
29. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Конопляченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Пирогов В. О., Волошко Т. П., Глушкова Д. Б. Розробка системи спрямованого вибору найбільш ефективної технології підвищення якості бабітових покриттів підшипників ковзання. Ч. 2. Математична модель зносу бабітових покриттів. Критерії вибору технології нанесення бабітових покриттів. *Metallophysics and Advanced Technologies* 2022. Vol. 44, № 12. Pp. 1643–1659.
30. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Volchuk V. M., Murzakhmetova U. A. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. *Functional Materials*. 2023. Vol. 30, № 1. Pp. 74–78. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>.
31. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Saenko V. A., Volchuk V. M., Kalinin A. V., Kalinina N. E. Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system. *Питання атомної науки та техніки*. 2023. № 2 (144). С. 105–109.
32. Hlushkova D. B., Kalinin A. V., Kalinina N. E., Volchuk V. M., Saenko V. A., Efimenko A. A. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide. *Питання атомної науки та техніки*. 2023. № 2 (144). С. 126–129.

## REFERENCES

1. Hlushkova D.B. *Zmitsnennya ta vidnovlennya detaley tsylindro-porshnevoyi hrupy* [Strengthening and restoration of cylinder-piston group parts]. Kharkiv, 2021, 200 p. (in Ukrainian).
2. Hlushkova D., Kalinin V., Stepanyuk A., Hnatiuk A. and Serzhenko I. Studying the properties of steel for sidewalls of chute conveyors. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2021, 758 p. DOI: 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II.
3. Hlushkova D.B. and Bagrov V.A. *Zastosuvannya suchasnykh tekhnolohiy dlya pidvyshchennya znosostykyosti detaley ob'yemnoho hidropryvodu* [Application of modern technologies to increase the wear resistance of parts of a volumetric hydraulic drive]. Theoretical and practical aspects of modern scientific research : collective monograph. Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2022, pp. 171–178. (in Ukrainian).

4. Glushkova D.B., Ryzhkov Yu.V. and Baidala V.Yu. *Naukovi ta tekhnolohichni osnovy pidvyshchennya trybolohichnykh kharakterystyk detaley mekhatronnykh system* [Scientific and technological basis of improving the tribological characteristics of parts of mechatronic systems]. Kharkiv, 2022, 119 p. (in Ukrainian).
5. Hlushkova D.B. *Pidvyshchennya nadiynosti robochykh orhaniv hidrofikovanykh mashyn spetsial'noho pryznachennya : monohrafiya* [Increasing the reliability of working bodies of special-purpose hydrofed machines : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2023, 258 p. (in Ukrainian).
6. Gluskova D. and Volchuk V. Determination of the optimal parameters of laser boriding to improve the wear resistance of piston rings. *Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni* [New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering]. 2022, no. 2, pp. 29–32.
7. Glushkova D.B., Kalinina N.E., Demchenko S.V. and Nosova T.V. *Pidvyshchennya koroziynoyi stiykosti zvarnykh z'yednan' v rezul'tati termichnoyi obrobky* [Increasing the corrosion resistance of welded joints as a result of heat treatment]. *Metallovedenye y termycheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2022, no. 1, pp. 21–28. (in Ukrainian).
8. Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Tsokur N.I., Nosova T.V., Bagrov V.A. and Demchenko S.V. *Obgruntuvannya vyboru skandiyu dlya mikrolehuvannya vysokomitsnykh alyuminiyevykh splaviv* [Justification of the choice of scandium for microalloying of high-strength aluminum alloys]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya* [Aviation and Space Technology and Technology]. 2022, no. 4, iss. 2 (182), pp. 114–118. (in Ukrainian).
9. Bagrov V.A. and Glushkova D.B. *Formuvannya struktury ta fazovoho skladu znosostiyykh staley, lehovanykh tytanom* [Formation of the structure and phase composition of wear-resistant steels doped with titanium]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2022, vol. 97, pp. 30–33. (in Ukrainian).
10. Bagrov V.A. and Glushkova D.B. *Vlastyivosti znosostiyykh beznikelevykh vtorynnotverdiyuchykh staley dlya naplavlennya shtampiv haryachoho obroblyennya metaliv* [Properties of wear-resistant nickel-free secondary hardening steels for surfacing dies of hot metal processing]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2022, vol. 97, pp. 34–37. (in Ukrainian).
11. Glushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V. and Kalinina N.E. *Struktura y vlastyivosti poroshkovykh hazoplazmennykh pokryttiv na osnovi nikelyu* [Structure and properties of powder gas plasma coatings based on nickel]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2022, vol. 97, pp. 74–81. (in Ukrainian).
12. Bolshakov V.I., Kalinin O.V., Glushkova D.B., Tokhtar G.I., Bagrov V.A. and Hnatyuk A.A. *Sposoby otrymannya dyspersnoyi struktury ta pidvyshchennya mitsnosti kremniy-marhantsevystykh staley* [Methods of obtaining a dispersed structure and increasing the strength of silicon-manganese steels]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 7–12. (in Ukrainian).
13. Hlushkova D.B. and Bagrov V.A. *Doslidzhennya vlastyvostey poverkhnevyykh shariv porshnevyykh kilets' pislya hazotermichnoho napyleniya* [Investigation of the properties of the surface layers of piston rings after gas-thermal spraying]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 8–22. (in Ukrainian).
14. Hlushkova D.B. and Bagrov V.A. *Udoskonalennya tekhnolohichnoho protsesu pidvyshchennya dohvovichnosti robochoho instrumenta hidromolotov detonatsiynym napylennyam* [Improvement of the technological process of increasing the durability of the working tool of hydraulic hammers by detonation spraying]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 39–46. (in Ukrainian).
15. Glushkova D.B., Avrunin G.A., Ryzhkov Yu.V., Voronkov O.I., Stepaniuk A.I. and Hnatiuk A.A. *Pidvyshchennya znosostiyykh vuzliv ob'yemnoho hidropryvoda* [Increasing the wear resistance of units of a volumetric hydraulic drive]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 80–84. (in Ukrainian).
16. Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Dzhur Y.O., Khodyrev S.Ya. and Kalinin V.T. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welding joints. *Jornal of Chemistry and Technologies*. 2020, no. 28 (1), pp. 34–41.
17. Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Voronkov A.I., Sanin A.F., Kalinin V.T., Nosova T.V. and Bondarenko O.V. Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions. *Functional Materials*. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 508–512.
18. Dudukalov Y., Ternyuk M. and Hlushkova D. Synthesis of the fuel systems boron-containing metalized fuels for vehicles. *SAE Technical Paper 2020-01-2155*. 2020, p. 6.
19. Leontiev D., Voronkov O., Korohodskiy V., Hlushkova D. and Nikitchenko I. Mathematical modeling of operating processes in the pneumatic engine of the car. *SAE Technical Paper 2020-01-2222*. 2020, p. 6.
20. Hlushkova D., Bagrov V., Stepaniuk A., Hrinchenko E.D., Hnatiuk A.A., Kalinina N.E. and Kalinin V.T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. Corrosion resistance of reinforced layers of 15X11MΦ steel steam turbine blades. *VANT* [VANT]. 2021, no. 2 (132), pp. 136–141.
21. Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M., Antoszewski B., Kundera Cz., Konopiianchenko Ie., Tarelnik N., Hudkov S. and Zahorulko A. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible machine flexible coupling. Part 1. Analysis of the reasons affecting fretting resistance of flexible elements from expansion coupling. *Jornal of Physics : Conference Series*. 2021, no. 1741, 11 p.



22. Hlushkova D., Voronkov A., Kalinina N., Kalinin V., Polonskyi L. and Stepaniuk A. Structural and phase composition features of titanium and chromium nitride coatings obtained by ion-plasma deposition. *Functional Materials*. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 710–715.
23. Hlushkova D.B., Kirichenko I.H., Bahrov V.A., Kalinina N.Ye. and Nosova T.V. Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts. *PAST*. 2021, no. 5 (135), pp. 139–145.
24. Bolshakov V.I., Kalinin A.V., Hlushkova D.B., Ryzhkov Y.V. and Bagrov V.A. Transformation of structure and properties of structural steel during nanomodification and strengthening treatment. *Functional Materials*. 2021, vol. 28, no. 3, pp. 486–491.
25. Bolshakov V.I., Kalinin O.I., Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Voronkov O.I., Ryzhkov Y.V. and Stepanyuk A.I. Increasing the corrosion resistance of welded joints of heat-resistant nickel alloy with steel. *VANT*. 2022, no. 1 (37), pp. 195–198.
26. Hlushkova D.B., Voronkov O.I., Ryzhkov Y.V., Kalinin N.E. and Nosova T.V. Peculiarities of the formation of a hardened layer during laser boronizing of piston rings. *VANT*. 2022, no. 1 (37), pp. 199–201.
27. Vahrusheva V.S., Hlushkova D.B., Volchuk V.M., Nosova T.V., Mamhur S.I., Tsokur N.I., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Ryzhkov Y.V. and Scrypnikov V.O. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. *VANT*. 2022, no. 4 (140), pp. 137–140.
28. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V. and Kalinina N.E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *VANT*. 2022, no. 4 (140), pp. 125–130.
29. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko E.V., Tarelnyk N.V., Dumanchuk M.Yu., Pirogov V.O., Voloshko T.P. and Glushkova D.B. *Rozrobka systemy spryamovanoho vyboru naybil'sh efektyvnoyi tekhnolohiyi pidvyshchennya yakosti babbitovykh pokryttivpidshypnykiv kovzannya. Ch. 2. Matematychnyy model' znosu babbitovykh pokryttiv. Kryteriyi vyboru tekhnolohiyi nanesennya babbitovykh pokryttiv* [Development of a system of targeted selection of the most effective technology for improving the quality of babbitt coating of sliding bearings. Part 2. Mathematical model of wear of babbitt coatings. Criteria for choosing a technology for applying babbitt coatings]. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2022, vol. 44, no. 12, pp. 1643–1659. (in Ukrainian).
30. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Volchuk V.M. and Murzakhmetova U.A. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. *Functional Materials*. 2023, vol. 30, no. 1. pp. 74–78. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>.
31. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Saenko V.A., Volchuk V.M., Kalinin A.V. and Kalinina N.E. Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system. *Pytannya atomnoyi nauky ta tekhniky* [Issues of Atomic Science and Technology]. 2023, no. 2 (144), pp. 105–109.
32. Hlushkova D.B., Kalinin A.V., Kalinina N.E., Volchuk V.M., Saenko V.A. and Efimenko A.A. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide. *Pytannya atomnoyi nauky ta tekhniky* [Issues of Atomic Science and Technology]. 2023, no. 2 (144), pp. 126–129.

Надійшла до редакції: 02.06.2023.