



*М. І. Пашечко¹, Т. Г. Бережанський²,
М. З. Пелешко², О. І. Башинський²*

¹Люблінський технічний університет, Польща

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9317-6141> – М. І. Пашечко

<https://orcid.org/0000-0002-1290-706X> – Т. Г. Бережанський

<https://orcid.org/0000-0002-9315-1590> – М. З. Пелешко

<https://orcid.org/0000-0002-0243-7519> – О. І. Башинський



mpashechko@hotmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАНЕСЕНИХ РЕГЕНЕРАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ ПРОТИПОЖЕЖНОЇ ТЕХНІКИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Сьогодні підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій при реалізації функції держави із захисту населення, територій і навколишнього середовища від надзвичайних ситуацій працюють у надскладних умовах. До великої кількості пожеж та надзвичайних ситуацій додалися надзвичайні ситуації спричинені збройною агресією росії, серед яких: завали будівель цивільної, промислової та критичної інфраструктури, аварії на підприємствах різних галузей, ракетні та авіаційні удари та ін. Під час цілодобової роботи із порятунку потерпілих, гасіння пожеж, ліквідації аварій та надзвичайних ситуацій на межі своїх можливостей, а часто і за межею, працюють не лише рятувальники, а й обладнання з яким вони працюють. Інтенсивність роботи призводить до зношування деталей пожежної, аварійно-рятувальної та інженерної техніки та обладнання. Також зараз в пожежно-рятувальних підрозділах України часто використовують пожежну техніку, аварійно-рятувальне та інженерне обладнання закордонного виробництва, які були надані Україні в рамках допомоги та підтримки світовою спільнотою.

Заміна зношених деталей техніки та обладнання, які сьогодні працюють в Україні (особливо наданої країнами-партнерами), є надзвичайно складним, тривалим і в деяких випадках навіть неможливим завданням. Існують методи відновлення, регенерації та підвищення зносостійкості елементів і вузлів пожежної техніки та обладнання за допомогою евтектичних покриттів. Тому розробка та дослідження евтектичних покриттів для відновлення зношених деталей пожежної, аварійно-рятувальної та інженерної техніки і обладнання, а також регенерація окремих вузлів та робочих органів, що дасть можливість збільшити ресурс роботи, зносостійкість та довговічність цих видів техніки та обладнання є актуальним завданням на сьогодні. Метою роботи є дослідження якості нанесення регенераційного евтектичного покриття системи Fe-Mn-C-B-Si легованого Cr обраного за результатами досліджень зносостійкості на робочий орган аварійно-рятувальних ножиць та визначення його ефективності у безпосередній роботі обладнання за призначенням.

Досліджено якість наплавлення регенеративного евтектичного покриття системи Fe-Mn-C-B-Si, легованого Cr, що відзначається найкращою зносостійкістю серед раніше досліджених взірців. Покриття характеризується хорошими зварювальними властивостями. За результатами комп'ютерної рентгенівської томографії виявлено пористість (бульбашку) у наплавленні на ніж розмірами 1,155 мм. Як показали подальші дослідження в експлуатації ця бульбашка не впливає на експлуатаційні характеристики ножів.

Визначення ефективності регенераційного покриття з евтектичного сплаву системи Fe-Mn-C-B-Si легованого Cr у середній роботі за призначенням полягало у перерізанні арматурних прутів марки А-500 діаметром 8 мм ножами із нанесеним регенераційним покриттям та ножів серійного виробництва та порівняння рівня їх зношування. За результатами дослідження встановлено, що ножі із нанесеним регенераційним покриттям відзначаються у 1,75 більшим ресурсом роботи у порівнянні з ножами серійного виробництва. Тобто можна стверджувати, що досліджуване евтектичне регенераційне покриття системи Fe-Mn-C-B-Si леговане Cr є ефективним для відновлення ножів аварійно-рятувальних ножиць. Застосування даного регенераційного покриття на пожежній техніці та аварійно-рятувальних інструментах потребує подальших досліджень та можливо коригування складу покриття.

Ключові слова: пожежна техніка, регенерація пожежної техніки, зносостійкі покриття, ресурс роботи, евтектичні покриття.

X-RAY TOMOGRAPHY OF DEPOSITION QUALITY AND RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF DEPOSED REGENERATION COATINGS FOR FIRE MACHINERY AND FIRE EQUIPMENT

Today, units of the State Service of Ukraine for Emergency Situations, in the implementation of the state's function of protecting the population, territories and environment from emergencies, work in extremely difficult conditions. To a large number of fires and emergencies, emergencies caused by Russia's armed aggression were added, including collapses of civil, industrial and critical infrastructure buildings, accidents at enterprises of various industries, missile and air strikes, etc. During the round-the-clock work of rescuing victims, extinguishing fires, and eliminating accidents and emergencies, not only rescuers, but also the equipment they work with, work at the limit of their capabilities, and often beyond the limit. The intensity of work leads to wear and tear of parts of firefighting, emergency rescue and engineering machinery and equipment. Also, fire-rescue units of Ukraine often use firefighting equipment, emergency-rescue and engineering equipment of foreign production, which were provided to Ukraine as part of the aid and support of the world community.

Replacing worn-out parts of machinery and equipment that are currently operating in Ukraine (especially provided by partner countries) is an extremely difficult, long-term and, in some cases, even impossible task. There are methods of restoring, regenerating and increasing the wear resistance of elements and units of firefighting equipment and equipment with the help of eutectic coatings. Therefore, the development and research of eutectic coatings for the restoration of worn parts of the fire, emergency rescue and engineering machinery and equipment, as well as the regeneration of individual nodes and working bodies, will increase the service life, wear resistance and durability of these types of machinery and equipment, is an urgent task today. The purpose of the work is to study the quality of application of the regenerative eutectic coating of the Fe-Mn-C-B-Si system alloyed with Cr selected based on the results of wear resistance studies on the working body of emergency and rescue scissors and to determine its effectiveness in the direct operation of the equipment as intended.

The quality of deposition of the regenerative eutectic coating of the Fe-Mn-C-B-Si system doped with Cr, which is characterized by the best wear resistance among the previously studied samples, was investigated. The coating is characterized by good welding properties. According to the results of computer X-ray tomography, a cavity (bubble) in the coating on the knife with dimensions of 1.155 mm was found. As further studies in operation have shown, this bubble does not affect the operational characteristics of the knives.

Determining the effectiveness of the regeneration coating from the eutectic alloy of the Fe-Mn-C-B-Si system alloyed with Cr in the direct work as intended consisted in cutting the reinforcing bars of the A-500 brand with a diameter of 8 mm with knives with applied regeneration coating and knives of serial production and comparing the level of their wear. According to the results of the study, it was established that knives with an applied regeneration coating have a 1.75 times greater service life compared to mass-produced knives. That is, it can be stated that the researched eutectic regeneration coating of the Fe-Mn-C-B-Si system alloyed with Cr is effective for restoring the blades of emergency and rescue scissors. The use of this regenerative coating on fire equipment and emergency rescue tools requires further research and possible adjustment of the composition of the coating.

Keywords: fire equipment, regeneration of fire equipment, wear-resistant coatings, service life, eutectic coatings.

Постановка проблеми

Сьогодні підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій під час реалізації функції держави із захисту населення, територій і навколишнього середовища від надзвичайних ситуацій працюють у надскладних умовах. До великої кількості пожеж та надзвичайних ситуацій додалися надзвичайні ситуації, спричинені збройною агресією Росії, серед яких: завали будівель цивільної, промислової та критичної інфраструктури, аварії на підприємствах різних галузей, ракетні та авіаційні удари та ін. Під час виконання завдань за призначенням пожежно-рятувальні підрозділи використовують різноманітну пожежну техніку, аварійно-рятувальний та інженерний інструмент, а також багато інших технічних засобів різного

призначення. В таких умовах, від наявності, справності та надійності обладнання, без перебільшення, залежать людські життя.

Під час цілодобової роботи із порятунку потерпілих, гасіння пожеж, ліквідації аварій та надзвичайних ситуацій на межі своїх можливостей, а часто і за межею, працюють не лише рятувальники, а й обладнання, з яким вони працюють. Інтенсивність роботи призводить до зношування деталей пожежної, аварійно-рятувальної та інженерної техніки та обладнання. Також зараз в пожежно-рятувальних підрозділах України часто використовують пожежну техніку, аварійно-рятувальне та інженерне обладнання закордонного виробництва, які були надані Україні в рамках допомоги та підтримки світовою спільнотою.

Заміна зношених деталей техніки та обладнання, які сьогодні працюють в Україні (особливо наданої країнами-партнерами), є надзвичайно складним, тривалим і в деяких випадках навіть неможливим завданням. Існують методи відновлення, регенерації та підвищення зносостійкості елементів і вузлів пожежної техніки та обладнання за допомогою евтектичних покриттів [1-4]. Тому розробка та дослідження евтектичних покриттів для відновлення зношених деталей пожежної, аварійно-рятувальної та інженерної техніки та обладнання, а також регенерація окремих вузлів та робочих органів, що дасть змогу збільшити ресурс роботи, зносостійкість та довговічність цих видів техніки та обладнання, є актуальним завданням на сьогодні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зносостійкі евтектичні покриття системи Fe-Mn-C-B-Si, леговані Cr, виготовлені у вигляді порошкових дротів, мають в 1,8-10 разів вищу зносостійкість порівняно з матеріалами серійного виробництва [5-8].

Ці матеріали окрім високої зносостійкості також характеризуються хорошими зварювальними властивостями, завдяки чому їх можна наносити на деталі пожежної техніки та аварійно-рятувального обладнання за допомогою методів електродугового, плазмового наплавлення та методом напилення, а також іншими перспективними методами [6-10].

В роботі [4] було досліджено зносостійкість евтектичних покриттів різних складів, для вибору оптимального складу для регенерації елементів пожежної техніки та аварійно-рятувального обладнання. Було обрано евтектичне покриття системи Fe-Mn-C-B-Si, леговане Cr, яке відзначалось кращою зносостійкістю порівняно з іншими досліджуваними покриттями. Проте очевидно, що обране покриття необхідно дослідити у безпосередній роботі за призначенням після нанесення на робочі органи пожежного та аварійно-рятувального обладнання та оцінити його ефективність.

Також очевидно, що залежно від призначення та умов роботи пожежної техніки та

аварійно-рятувального чи інженерного обладнання, необхідно коригувати склад регенераційних покриттів.

Метою роботи є дослідження якості нанесення регенераційного евтектичного покриття системи Fe-Mn-C-B-Si легованим Cr обраного за результатами досліджень зносостійкості [4] на робочий орган аварійно-рятувальних ножиць та визначення його ефективності у безпосередній роботі обладнання за призначенням.

Обране за результатами досліджень зносостійкості [4] регенераційне покриття з евтектичного сплаву Fe-Mn-C-B-Si леговане Cr виготовлене у вигляді порошкових дротів для наплавлення. Потім його наносили на попередньо підготовлені частково зношені робочі органи пожежного та аварійно-рятувального інструменту, а саме: на ніж та упор ножиць «Гідрум Н-32», які працюють в умовах великих навантажень за відсутності або при недостатньому змащуванні. Хімічний склад досліджуваного регенераційного покриття наведений в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваного регенераційного покриття

Хімічний елемент	Вміст елементів мас. %
Mn	11,37
C	0,9
B	2,7
Si	2,48
S	0,09
P	0,028
Cr	18,2
Fe	решта

Для нанесення регенераційного покриття було використано метод дугового наплавлення в газовій атмосфері аргону GMA (MAG), яке проводили на установці Pro Evolution Kemppi (рис. 1).



Рисунок 1 – Установа Pro Evolution Kemppi

Кемпрі Pro Evolution являє собою модульну систему зварювання з цифровим управлінням, яка призначена для зварювання або наплавлення методами MIG/MAG, TIG і MMA. Така установка, зважаючи на відносно невеликі габарити та вартість, може використовуватись для нанесення регенераційних евтектичних покриттів на деталь пожежної техніки та аварійно-рятувального чи інженерного обладнання ДСНС України.

Для отримання правильної форми (геометричні особливості робочих органів аварійно-рятувальних ножиць) після наплавлення проводили шліфування на плоскошліфувальній

машині KENT. Вона підтвердила мартенситну структуру зварних швів.

Процес наплавлення та аналізів проводився на ряді випробувальних стендів, представлених на рис. 1. Технологічний стенд складається зі зварювального інвертора TIG AC / DC ControlPro LORCH і зварювального стола з нижньою витяжкою PLYMOVENT.

Використовували такі технологічні параметри процесу наплавлення: сила струму 80 А, напруга 8 В, позитивна полярність. Загальний вигляд ножів з нанесеним покриттям та місця точкового хімічного аналізу представлені на рис. 2.

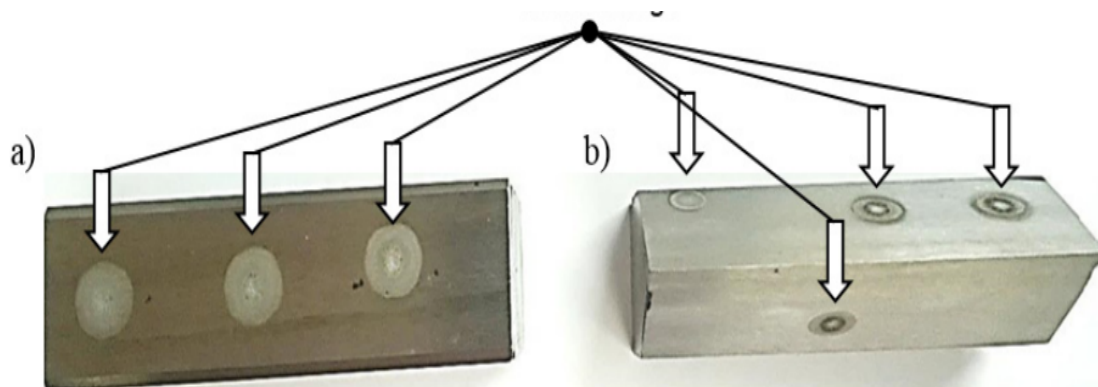


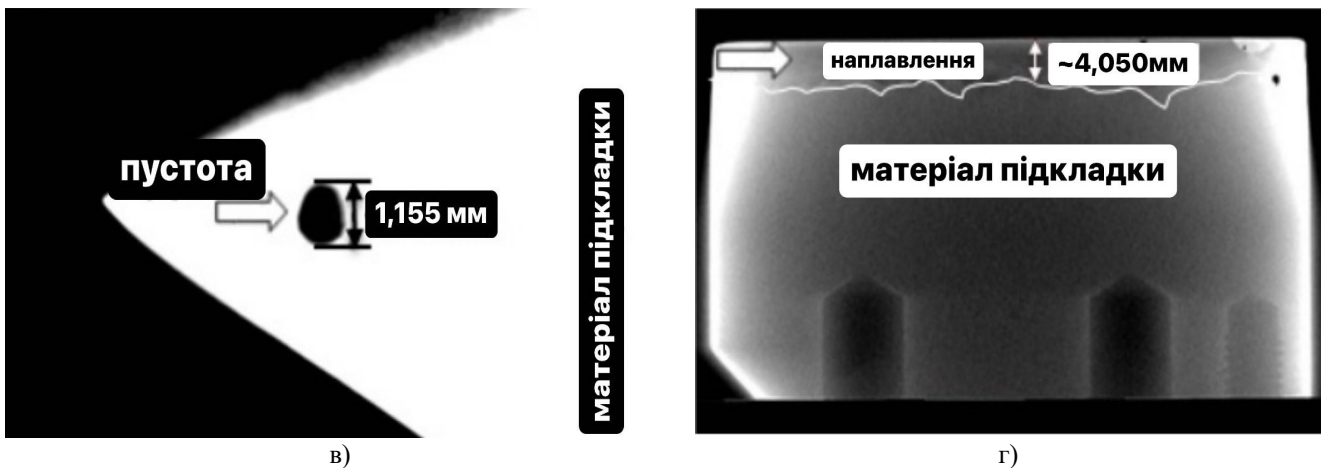
Рисунок 2 – Загальний вигляд ножів з нанесеним регенераційним покриттям та місця точкового хімічного аналізу: упор (а), ніж (б)

Якість наплавлення, пустоти, розриви внутрішньої структури та внутрішні дефекти оцінювали за допомогою комп'ютерного томографа X25 (North Star Imaging). Як джерело рентгенівського випромінювання використовувався Hamamatsu L12161-07. Основні параметри процесу становлять: напруга – 150 кВ і сила струму – 500 мкА. Дослідження полягало у спрямуванні рентгенівського променя на досліджуваній об'єкт і реєстрації його інтенсивності на панелі детектора з іншого боку. Та після аналізу та оцифрування

отримували зображення. Рентгенівське зображення наплавлення регенераційного покриття на ріжучу кромку ножа представлено на рис. 3 а. На підставі отриманих рентгенівських зображень регенованих робочих органів аварійно-рятувальних ножиць виявлено кілька внутрішніх дефектів, а саме: пустота із середнім розміром 1,155 мм (рис. 3 б, в). Імовірно утворення пустоти (бульбашки) відбулось через потрапляння повітря під час зварювання.



Рисунок 3 – Рентгенівські зображення наплавлення регенераційного покриття: а-б) ніж з гострим краєм



Продовження рисунка 3 – Рентгенівські зображення наплавлення регенераційного покриття: в) ніж з гострим краєм, г) упор ножа

Товщина наплавки регенераційного покриття, виконаного на упорі ножиць, становила близько 4 мм (рис. 3 d). Крім пустоти (бульбашки) і пор, інших внутрішніх дефектів наплавки регенераційного покриття на ніж та упор аварійно-рятувальних ножиць не виявлено. Також хочеться відмітити відсутність тріщин або розшарувань на ріжучій кромці ножа. Вміст у відсотках дефектів у наплавленому покритті по відношенню до загального поперечного перерізу для шести випадково вибраних точок (позначених як: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) не перевищує 2%.

Визначення ефективності регенераційного покриття з евтектичного сплаву системи Fe-Mn-C-B-Si легованого Cr у безпосередній роботі за призначенням полягало у перерізанні арматурних прутів марки А-500 діаметром 8 мм ножами із нанесеним регенераційним покриттям та ножів серійного виробництва і порівняння рівня їх зношування. Перед проведенням експерименту вважали, що регенераційним покриттям можна вважати ефективним та можливим для застосування, якщо рівень зношування ножів з нанесеним покриттям не перевищує рівень зношування ножів серійного виробництва. Перед випробуваннями ножі із регенераційним евтектичним покриттям та ножі серійного виробництва не містили дефектів чи слідів зношування. Лише на ножах із регенераційним покриттям були наявні характерні сліди оцінки хімічного складу за допомогою спектрометра. Через їх локальний характер було припущено, що ці сліди не впливають на перебіг процесу зношування та термін експлуатації випробуваних ножів. Після кожних 50 різів арматурних прутів поверхні ножів із нанесеним

покриттям та ножів серійного виробництва досліджували на зношування поверхневого шару з метою виявлення тріщин, нерівностей та дефектів.

Після 50 циклів різання поверхні обох ножів не показали жодних змін у геометрії, сколів чи інших дефектів на ріжучих кромках. Лише наступні етапи експлуатаційних випробувань (200 циклів) показали декілька деформацій ріжучої кромки ножа та зношування ріжучих поверхонь ножів серійного виробництва розмірами не більше 0,1 мм. На ріжучій кромці ножів із нанесеним регенераційним покриттям слідів зношування та дефектів не виявлено. Після 500 циклів різання на поверхні леза ножів серійного виробництва з'являються численні вм'ятини та видимі сліди абразивного зносу. Поверхня та ріжучі кромки ножа з наплавленим регенераційним покриттям показали лише перші видимі ознаки зносу. У наступних циклах експлуатаційних випробувань (800 циклів) збільшувалися абразивне зношування і локальні деформації, а також з'явилися викришування ріжучої кромки наплавленого інструменту до 0,3 мм, але, попри те, це значно нижчі значення, ніж ножа серійного виробництва (0,7 мм). Ріжуча поверхня ножа серійного виробництва характеризується значним збільшенням кількості дефектів і вм'ятини. Це передбачає значне збільшення необхідної сили для здійснення різання та додаткові навантаження на гідроциліндр. Вигляд ріжучих елементів ножів серійного виробництва та ножів із нанесеним регенераційним покриттям після 870 циклів представлено на рис. 4.



а)



б)

Рисунок 4 – Вигляд ріжучих елементів ножів після 870 циклів різання:
а) серійного виробництва; б) із регенераційним покриттям

Після 870 циклів різання поверхня ріжучого елемента ножів серійного виробництва під час випробування характеризується наявністю дуже великої кількості дефектів, вм'ятин та відколів лева, що унеможлиблює проведення подальших досліджень. Відбувається значне притуплення ріжучої кромки ножів. Поверхня ріжучої кромки ножів із нанесеним регенераційним покриттям після 870 циклів різання характеризується дефектами, вм'ятинами та слідами абразивного зношування, проте подальша експлуатація та випробування цілком можливі, оскільки значного збільшення зусиль для різання не спостерігалось. Істотне збільшення зусиль для різання ножом із нанесеним регенераційним покриттям спостерігалось після 1430 циклу різання. Також ріжуча поверхня ножа характеризувалась великою кількістю дефектів, відколів лева та вм'ятин. Після 1430 циклу різання сталеві арматури ножом із нанесеним регенераційним покриттям випробування було припинене через побоювання пошкодити ножиці.

Хоча процес дослідження було зупинено на етапі 1430 циклів різання, результат проведених випробувань ножів із нанесеним регенераційним покриттям в безпосередній роботі – це майже вдвічі збільшений ресурс роботи ріжучих елементів гідравлічних ножиць «Гідрум Н-32».

Висновки. За результатами проведених досліджень можна сформулювати такі висновки:

1. Досліджено якість наплавлення регенеративного евтектичного покриття системи Fe-Mn-C-B-Si, легованого Cr, що відзначається найкращою зносостійкістю серед раніше досліджених зразків. Покриття характеризується хорошими зварювальними властивостями. За результатами комп'ютерної рентгенівської томографії у наплавленні на ніж виявлено пустоту (бульбашку) розмірами 1,155 мм. Як показали

подальші дослідження у процесі експлуатації ця бульбашка не впливає на експлуатаційні характеристики ножів.

2. Визначення ефективності регенераційного покриття з евтектичного сплаву системи Fe-Mn-C-B-Si легованого Cr у безпосередній роботі за призначенням полягало у перерізання арматурних прутів марки А-500 діаметром 8 мм ножами із нанесеним регенераційним покриттям та ножів серійного виробництва і порівняння рівня їх зношування. За результатами дослідження встановлено, що ножі із нанесеним регенераційним покриттям відзначаються у 1,75 раза більшим ресурсом роботи порівняно з ножами серійного виробництва. Тобто можна стверджувати, що досліджуване евтектичне регенераційне покриття системи Fe-Mn-C-B-Si леговане Cr є ефективним для відновлення ножів аварійно-рятувальних ножиць.

3. Застосування цього регенераційного покриття на пожежній техніці та аварійно-рятувальних інструментах потребує подальших досліджень та можливо коригування складу покриття.

Список літератури:

1. Бережанський Т.Г., Мошкола Я.І. Підвищення ресурсу роботи аварійно-рятувального обладнання евтектичними покриттями. *Вісник ЛДУВЖД: збірник наукових праць* 2019. №23. С. 36–40. DOI: 10.32447/20784643.20.2019.06.
2. Pashechko M., Kindrachuk M., Humeniuk I., Berezhanskyi T. Gradient composite coatings for working surfaces of braking devices. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2018: Vol. 12. Is. 2. P. 1-5. DOI: 10.12913/22998624/70759.
3. Бережанський Т.Г., Башинський О.І., Бойко Т.В. Дослідження якості наплавлення захисних евтектичних покриттів на робочі частини пожежного інструменту. *Пожежна безпека: збірник наукових праць*. 2016. №29. С. 13–17.

4. Бережанський Т.Г., Пашечко М.І. Розробка покриттів для регенерації вузлів пожежної техніки та протипожежного обладнання. *Пожежна безпека: збірник наукових праць*. 2021. №39. С. 5–11. DOI: 10.32447/20786662.39.2021.01

5. Костецкий Б. И. Фундаментальные закономерности трения и износа – Київ: Наукова думка, 1981.

6. Сухенко Ю. Г., Дзюб О. Г., Голубець В. М., Гасій О. Б. Дослідження електрохімічних процесів під час корозійно-механічного зношення іонно-плазмових покриттів. *Проблеми тертя та зношування* : науково-технічний збірник. К.: НАУ, 2007. Вип. 47. С. 67-74.

7. Голубець В.М., Білоус О.В. Розробка нового евтектичного електродного сплаву для нанесення зносостійких покриттів на ріжучий інструмент комплексним електроіскровим легуванням і лазерною обробкою. *Проблеми трибології – ХНУ*, 2001. Вип. 2. С.56 – 61.

8. Amiri M., Khonsari M. M., On the Thermodynamics of Friction and Wear - *A Review*, *Entropy* 12, 2010, P. 1021-1049. doi:10.3390/e12051021.

9. Luo Q., Zhou Z., Rainforth W. Bolton M. Effect of tribofilm formation on the dry sliding friction and wear properties of magnetron sputtered TiAlCrYN coatings. *Tribology Letters*, 2009. P. 113-124 DOI:10.1007/s11249-009-9415-9.

10. Lenik K., Pashechko M., Dziedzic K., Barszcz M. The surface self-organization in process friction and corrosion of composite materials. *Archives of Materials Science and Engineering*, Volume 30, Issue 1, 2008, P. 9-12. DOI 10.3390/ma13010075.

References:

1. Berezhanskyi T., Moshkola Ya. Improving work resource of safety equipment for eutectic coating. *Visnyk LDUBGD: Zbirnyk naukovykh prac.*. 2019. №23. P. 36–40. DOI: 10.32447/20784643.20.2019.06.

2. Pashechko M., Kindrachuk M., Humeniuk I., Berezhanskyi T. Gradient composite coatings for working surfaces of braking devices. *Advances in*

Science and Technology Research Journal, 2018: Vol. 12. Is. 2 P. 1-5. DOI: 10.12913/22998624/70759.

3. Berezhanskyi T., Bashynskyi O., Boyko T. “Investigation of the surfacing quality of protective eutectic coatings on the working parts of a fire tool” *Zbirnyk naukovykh prac “Pozhezhna bezpeka”* vol. 1, no. 29, pp. 13-17.

4. Berezhanskyi T., Pashechko M. “Development of coatings for regeneration of fire tools and equipment” *Zbirnyk naukovykh prac “Pozhezhna bezpeka”*, №39. P. 5–11. DOI: 10.32447/20786662.39.2021.01

5. Kostetskyi B.I. (1981) *Fundamentalni zakonomirnosti tertya ta znoshuvannya* [Fundamental patterns of friction and wear]. *Naukova dumka*, Kyiv, Ukraine.

6. Sukhenko Yu., Dzyub O., Holubets V., Hasiy A. Investigation of electrochemical processes during corrosion-mechanical wear of ion-plasma coatings. *Problemy tertya ta znoshuvannya* : naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2007. Vol. 47. P. 67-74.

7. Holubets V, Bilous O. Development of a new eutectic electrode alloy for application of wear-resistant coatings on cutting tools by complex electrospark alloying and laser processing. *Problemy trybolohii*. 2001. vol 2. P.56 – 61.

8. Amiri M., Khonsari M. M., On the Thermodynamics of Friction and Wear - *A Review*, *Entropy* 12, 2010, P. 1021-1049. doi:10.3390/e12051021

9. Luo Q., Zhou Z., Rainforth W. Bolton M. Effect of tribofilm formation on the dry sliding friction and wear properties of magnetron sputtered TiAlCrYN coatings. *Tribology Letters*, 2009. P. 113-124 DOI:10.1007/s11249-009-9415-9

Lenik K., Pashechko M., Dziedzic K., Barszcz M. The surface self-organization in process friction and corrosion of composite materials. *Archives of Materials Science and Engineering*, Volume 30, Issue 1, 2008, P. 9-12. DOI 10.3390/ma13010075

© М. І. Пашечко, Т. Г. Бережанський,
М. З. Пелешко, О. І. Башинський, 2022.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 24.11.2022.

Прийнято до публікації 12.12.2022.