



Т. Г. Бережанський¹, М. І. Пашечко²

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

²Люблінський технічний університет, м. Люблін, Польща

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

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



berezhansky90@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВТОРИННИХ ПОКРИТТІВ НА ЕЛЕМЕНТАХ МЕХАНІЗОВАНОГО ПЕРЕНОСНОГО ПОЖЕЖНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Проблема. Сьогодні підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій працюють у вкрай складних умовах. Враховуючи численні надзвичайні ситуації, пожежі та воєнний стан і збройну агресію росії, не лише особовий склад ДСНС, а й техніка та обладнання, яку вони використовують, працюють на межі своїх можливостей. Інтенсивність роботи призводить до зносу пожежної, рятувальної та інженерної техніки, а також обладнання. Крім того, українські пожежно-рятувальні підрозділи зараз часто використовують пожежну, рятувальну та інженерну техніку іноземного виробництва, надану Україні в рамках допомоги та сприяння міжнародної спільноти.

Заміна витратних частин техніки та обладнання, що експлуатується в Україні (особливо наданих країнами-партнерами), є дуже складним, затратним та трудомістким завданням. Існують способи відновлення, регенерації та підвищення зносостійкості елементів і деталей пожежної техніки та обладнання з використанням евтектичних покриттів. Тому розробка та дослідження евтектичних покриттів для відновлення зношених деталей пожежної, рятувальної та інженерної техніки та обладнання, а також для регенерації їх окремих деталей та робочих органів є актуальним завданням сьогодення, оскільки дасть змогу підвищити термін служби, зносостійкість та довговічність цього виду техніки та обладнання.

Метою роботи є дослідження ефективності регенераційних евтектичних покриттів системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr, підібраних на основі результатів випробувань на зносостійкість сплавів та визначення їх ефективності при безпосередній експлуатації обладнання за призначенням.

Методи дослідження. Випробування на зносостійкість проводилися в лабораторних умовах. Для випробувань на зносостійкість евтектичних сплавів використовувався вдосконалений комп'ютеризований триботестер Amsler. Дослідження в експлуатації проводились шляхом проведення натурних випробувань.

Основні результати дослідження. Досліджено зносостійкість евтектичних покриттів системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr різних відсоткових складів та визначено склад, що характеризується найкращою зносостійкістю серед досліджуваних зразків.

Щоб дослідити ефективність регенеративних покриттів евтектичного сплаву системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr в умовах безпосередньої експлуатації, арматурну сталь марки А-500 діаметром 8 мм розрізали ножами з регенеративними покриттями і ножами заводського виробництва, а також порівняли величини їх зносу. Результати показали, що ножі з регенеративним покриттям Зр-2 працювали на 80 % довше, ніж серійні ножі та на 14% довше ніж ножі із покриттям Зр-1. Таким чином, евтектичне регенеративне покриття Зр-2 на основі сплаву Fe-Mn-C-B-Si є ефективним для ремонту ножів рятувальних ножиць та може бути використане для регенерації частин механізованого переносного пожежного інструменту, іншої протипожежної техніки та аварійно-рятувального обладнання.

Висновки. Досліджено зносостійкість регенераційних евтектичних покриттів та встановлено, що покриття складу Зр-1 відзначається найменшим масовим зношуванням серед досліджуваних.

Досліджено регенераційні покриття в експлуатації та встановлено, що відновлений ніж покриттям складу Зр-2 відзначається на 80 % вищими показниками зносостійкості в експлуатації ніж ножі заводського виробництва. Враховуючи хороші зварювальні властивості, відносно невелику вартість та широкий спектр методів нанесення, евтектичні регенераційні покриття системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr доцільно застосовувати для відновлення зношених деталей (частин) пожежної техніки та аварійно-рятувального обладнання.

Ключові слова: протипожежна техніка, механізований переносний пожежний інструмент, регенерація поверхонь пожежного інструменту, зносостійкі покриття, ресурс роботи, евтектичні покриття.

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF SECONDARY COATINGS ON FIRE EQUIPMENT AND COMPONENTS OF FIRE FIGHTING EQUIPMENT

Today, units of the State Emergency Service of Ukraine work in extremely difficult conditions, performing their state function of protecting the population, territory and natural environment from emergencies. Numerous fires and emergencies combined with emergencies caused by the Russian armed invasion, the collapse of civil, industrial and critical infrastructure, 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 the personnel of the State Emergency Service but also the machinery and equipment they use are working at the limit of their capabilities. The intensity of work leads to the wear and tear of firefighting, rescue and engineering equipment, as well as equipment. In addition, Ukrainian fire and rescue units now often use fire, rescue and engineering equipment of foreign production, provided to Ukraine as part of the aid and assistance of the international community.

Replacing expendable parts of machinery and equipment operated in Ukraine (especially provided by partner countries) is a very difficult, costly and time-consuming task. There are ways to restore, regenerate and increase the wear resistance of elements and parts of firefighting equipment and equipment using eutectic coatings. Therefore, the development and research of eutectic coatings for the restoration of worn parts of firefighting, rescue and engineering machinery and equipment, as well as for the regeneration of their individual parts and working bodies, is an urgent task today, as it will increase the service life, wear resistance and durability of this type of machinery and equipment.

The purpose of this work is to study the effectiveness of regenerative eutectic coatings of the Fe-Mn-C-B-Si-Cr system, selected based on the results of tests on the wear resistance of the alloys themselves and to determine their effectiveness during direct operation of the equipment as intended.

The wear resistance of eutectic coatings of the Fe-Mn-C-B-Si-Cr system with different percentage compositions was studied and the composition characterised by the best wear resistance among the studied samples was determined.

To investigate the effectiveness of regenerative coatings of the Fe-Mn-C-B-Si-Cr system eutectic alloy in the conditions of direct operation, reinforcing steel of the A-500 brand with a diameter of 8 mm was cut with knives with regenerative coatings and knives of serial production, and also compared the values of their wear.

The results showed that knives with a regenerative Zr-2 coating worked 80 % longer than serial knives and 14 % longer than knives with a Zr-1 coating. Thus, the Zr-2 eutectic regenerative coating based on the Fe-Mn-C-B-Si alloy is effective for repairing the blades of rescue scissors and can be used for the regeneration of parts of other firefighting equipment and emergency rescue equipment. Further research and possible adjustments to coating formulations are needed before this regenerative coating can be used in firefighting equipment and rescue tools.

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

Постановка проблеми Сьогодні підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій працюють у надзвичайно складних умовах у процесі виконання державної функції захисту населення, територій та навколишнього природного середовища від надзвичайних ситуацій. Окрім численних пожеж та надзвичайних ситуацій, до них додалися надзвичайні ситуації, спричинені російською збройною агресією (руйнування об'єктів цивільної, промислової та критичної інфраструктури, аварії на підприємствах різних галузей, ракетні обстріли та авіаудари). Під час виконання завдань за призначенням пожежно-рятувальні підрозділи використовують різноманітну пожежну техніку, аварійно-рятувальний інструмент, інженерний інструмент та багато інших технічних засобів різного призначення. У таких ситуаціях, без перебільшення, від наявності, справності та надійності техніки залежить життя людей.

Цілодобова робота з порятунку постраждалих, гасіння пожеж та ліквідації аварій і надзвичайних ситуацій виснажує не лише рятувальників, а й обладнання, яке вони використовують.

Інтенсивність роботи призводить до зношування пожежної, рятувальної та інженерної техніки та обладнання та механізованого переносного пожежного інструменту. Крім того, українські пожежно-рятувальні підрозділи часто використовують пожежну, рятувальну та інженерну техніку іноземного виробництва, надану Україні в рамках допомоги та сприяння міжнародної спільноти.

Заміна витратних частин техніки та обладнання, що експлуатується в Україні (особливо наданих країнами-партнерами), є дуже складним, затратним та трудомістким завданням. Евтектичні покриття можуть бути використані для відновлення, регенерації та підвищення зносостійкості елементів і деталей механізованого переносного пожежного інструменту та іншої протипожежної техніки та обладнання, у тому числі обладнання іноземного виробництва [1-4]. Тому розробка та дослідження евтектичних покриттів для відновлення зношених деталей механізованого переносного пожежного інструменту і протипожежної, аварійно-рятувальної та інженерної техніки та обладнання, а також для

регенерації окремих деталей та робочих органів є актуальним завданням сьогодення, оскільки дасть змогу підвищити термін служби, зносостійкість та довговічність цих видів техніки та обладнання.

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

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

В роботі [4 та 5] було досліджено зносостійкість евтектичних покриттів різних складів, зварювальні властивості, якість наплавлення на елемент пожежного обладнання. Також очевидно, що залежно

від призначення та умов роботи механізованого переносного пожежного інструменту і протипожежної техніки та аварійно-рятувального чи інженерного обладнання, необхідно коригувати склад регенераційних покриттів.

Метою роботи є дослідження ефективності регенераційних евтектичних покриттів системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr, підібраних на основі результатів випробувань на зносостійкість самих сплавів та визначення їх ефективності при безпосередній експлуатації обладнання за призначенням.

Виклад основного матеріалу.

Покриття, що розглядаються в цій роботі, були отримані методом дугового наплавлення порошковими дротами з евтектичних матеріалів різного складу в захисній атмосфері аргону. Хімічний склад покриттів був обраний на основі попередніх досліджень [2, 4, 5] та створено порошкові дроти для наплавлення наступних хімічних складів. Хімічний склад наплавлених покриттів з використанням евтектичних порошкових дротів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад евтектичних покриттів

Вміст елементів мас. %	Умовне позначення зразків		
	Зр-1	Зр-2	Зр-3
Mn	9,24	11,45	10,3
C	1,8	0,86	1,2
B	1,85	2,56	1,6
Si	3,07	2,5	3,32
S	0,06	0,1	0,05
P	0,029	0,026	0,04
Cr	11,0	18,1	24,3
Fe	решта	решта	решта

із покриттів системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr хімічного складу Зр-1, Зр-2 та Зр-3 було наплавлено зварні шви для дослідження їх зносостійкості.

У роботах [1, 4] було досліджено покриття системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr інших хімічних складів. Після проведення досліджень ряду хімічних складів (близько 15-20), враховуючи складність проведення їх випробувань одночасно, буде обрано найефективніші склади та проведено їх ґрунтовний аналіз для визначення оптимального покриття (одного або кількох) для відновлення зношених частин механізованого переносного пожежного інструменту.

Випробування на зносостійкість проводилися в лабораторних умовах. Основною перевагою такого підходу є його менша вартість порівняно з експлуатаційними випробуваннями. Для випробувань на зносостійкість евтектичних сплавів використовувався вдосконалений комп'ютеризований триботестер Amsler. Основними параметрами, що характеризують випробування на зносостійкість, є: тип контакту –

плоский (обладнання призначене для дослідження процесу тертя ковзання в системах стержень-диск); пари тертя стержень-диск досягаються завдяки обертанню диска і притисканню до нього зразка. Зразок являє собою квадрат зі стороною 10 мм або стрижень діаметром 10 мм; діаметр диска 90 мм; тип руху – тертя ковзання (швидкість 0,4 м/с); тривалість випробування – 8 годин; навантаження – 4, 8 і 15 МПа; шлях тертя – 8640 м; без змащення (сухе тертя); температура навколишнього середовища – $22 \pm 4^\circ\text{C}$.

Оскільки пожежно-рятувальні служби використовують пожежну техніку та обладнання в різних умовах і немає чітких або загальних умов експлуатації обладнання, випробування проводилися при різних навантаженнях 4 МПа, 8 МПа і 15 МПа.

Метою випробувань на зносостійкість було визначення покриття з евтектичного сплаву з найменшим масовим зносом. Результати масового зносу (втрата маси в міліграмах) покриттів після випробувань зносостійкості наведені на рисунку 1.

Масове зношування взірців

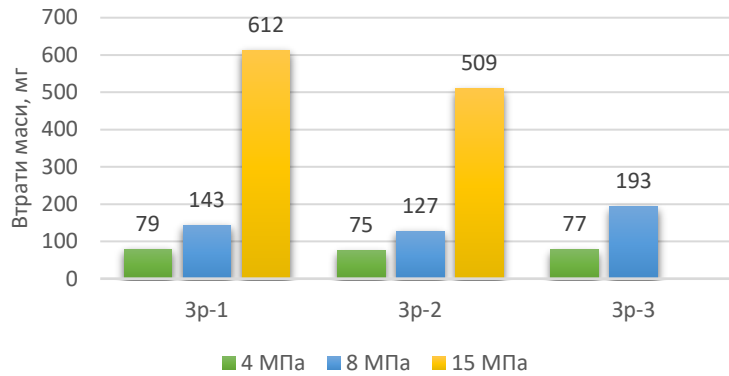


Рисунок 1 – Втрати маси взірців при навантаженнях 4, 8, 15 МПа для регенераційних покриттів з евтектичних сплавів системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr

Найменшим масовим зношуванням при усіх питомих навантаженнях характеризується регенераційне евтектичне покриття складу Зр-2. При 4 МПа – 75 мг; при 8 МПа – 127 мг; при 15 МПа – 509 мг. Дещо гірші результати показало покриття складу Зр-1 – 79, 143 та 612 мг відповідно, що, зважаючи на попередні дослідження, можна вважати хорошим показником зносостійкості [2, 4, 5]. В обох взірців спостерігається різке збільшення втрати маси при навантаженнях 15 МПа.

Регенераційне евтектичне покриття складу Зр-3 при навантаженнях 4 та 8 МПа характеризувалось втратою маси 77 та 193 мг відповідно. Проте під час досліджень зносостійкості при навантаженнях 15 МПа покриття Зр-3 почало втрачати цілісність структури та кришиться. З'явилися сколи та тріщини. Дослідження цього покриття було припинене через втрату цілісності структури при великих навантаженнях.

Для подальших досліджень в умовах експлуатації ми обрали евтектичні зносостійкі регенераційні покриття системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr хімічних складів Зр-1 та Зр-2.

Методику випробувань в умовах експлуатації ми дещо відкоригували у порівняно з [1, 4]. Щоб збільшити кількісні показники дослідження для аналізу та узагальнення результатів, ми порівняли масове зношування ножів, що дало змогу оцінити зношування до повної втрати експлуатаційних можливостей та скоротити кількість циклів різання і зменшити навантаження на гідроциліндр. Для дослідження в умовах експлуатації наносили евтектичні зносостійкі регенераційні покриття системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr хімічних складів Зр-1 та Зр-2 на частково зношені деталі пожежно-рятувального обладнання – ножі та упор гідравлічних аварійно-рятувальних ножиць Hydrum Н-32, що працюють в умовах високих

навантажень за відсутності або недостатнього змашування. Покриття наносили методом аргонодугового наплавлення GMA (MAG). Обидва покриття відзначаються хорошими зварювальними властивостями та міцним з'єднанням із матеріалом основи.

Потім оцінювали ресурс ножиць в процесі експлуатації. Суть експериментального дослідження полягала в порівнянні рівнів зносу ріжучих елементів серійних гідравлічних аварійно-рятувальних ножиць Hydrum Н-32 і ножів, регенованих захисними евтектичними покриттями Зр-1 і Зр-2. В експериментальних дослідженнях ми використовували зразки для різання арматури марки А-500 діаметром 8 мм.

Було проведено однакову кількість циклів різання арматури для усіх трьох досліджуваних взірців – по 500. До початку дослідження в умовах експлуатації вважалося, що регенеративне покриття буде ефективним і придатним для використання, якщо рівень зносу ножів з таким покриттям не перевищуватиме рівень зносу ножів заводського виробництва. До початку випробувань на ножах з відновленим евтектичним покриттям і на ножах заводського виробництва не було виявлено жодних ознак дефектів або зносу.

Було проведено заміри маси взірців перед та після дослідження, а також візуальну оцінку зношення та затуплення ріжучої кромки.

Після проведення 100 циклів різання поверхні усіх взірців не показали жодних змін у геометрії; сколів чи інших дефектів на ріжучих кромках взірців не виявлено. Подальші експлуатаційні випробування (200 циклів) показали деяку деформацію ріжучої кромки ножа і незначне зношення ріжучої поверхні ножів заводського виробництва з розмірами, що не перевищують 0,1 мм. На ріжучих кромках ножів з регенераційними покриттями не було виявлено слідів зносу або дефектів.

Після 350 циклу різання на поверхні леза серійних ножів з'являються вм'ятини, видимі ознаки зношення та притуплення ріжучої кромки, що впливає на зусилля різання та підвищує навантаження на гідроциліндр. На поверхні та кромці лез ножів з регенеративними покриттями були помітні лише перші видимі ознаки зношення.

Після 500 циклу різання поверхня ножа заводського виробництва характеризується великою кількістю вм'ятин та викришувань ріжучої кромки (до 0,5 мм). Зусилля для різання

значно вищі ніж у ножів із нанесеними евтектичними покриттями. Візуально знос ножа заводського виробництва є суттєво більшим ніж у взірців із регенераційними покриттями. Ножі із нанесеними покриттями характеризуються наявністю незначних вм'ятин та викришувань розміром 0,1-0,35 мм у взірця Зр-1 та 0,1-0,3 мм у взірця Зр-2. Зусилля різання незначно збільшилось у порівнянні із ножами заводського виробництва. Вигляд взірців після проведення дослідження в експлуатації наведено на рисунку 2.



Рисунок 2 – Вигляд взірців після проведення дослідження в експлуатації:
а) ножі заводського виробництва; б) взірець Зр-1; в) взірець Зр-2

По завершенні дослідження усі взірці було знову зважено для оцінки масового зношення.

Маса взірців до та після дослідження в експлуатації та втрати маси наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Маса взірців до та після дослідження в експлуатації та втрати маси

Назва взірця	Вага до випробування, г	Вага після випробування, г	Втрата маси, г
Ніж заводського виробництва	349,2	337,1	12,1 (3,47%)
Зр-1	324,6	316,8	7,8 (2,4%)
Зр-2	335,0	328,4	6,6 (1,97%)

Також втрати маси, відкришування та утворення вм'ятин прямо пропорційні затуплюванню ріжучої кромки, що ускладнює експлуатацію цього виду обладнання та при значних показниках збільшує час перерізання, а отже і час порятунку потерпілих.

Висновки. За результатами проведених досліджень можна сформулювати такі висновки:

1. Досліджено зносостійкість евтектичних регенераційних покриттів системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr при навантаженнях 4, 8, 15 МПа та встановлено, що покриття хімічного складу Зр-2 відзначається найкращими показниками зносостійкості серед досліджуваних, втрати маси якого становлять: при 4 МПа – 75 мг; при 8 МПа – 127 мг; при 15 МПа – 509 мг.

2. Досліджено ефективність регенеративних покриттів евтектичного сплаву системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr в умовах безпосередньої експлуатації, арматурну сталь марки А-500 діаметром 8 мм розрізали ножами з регенеративними покриттями і

ножами заводського виробництва, а також порівняли величини їх зносу. Результати показали, що ножі з регенеративним покриттям Зр-2 відзначались на 80% більшою зносостійкістю ніж серійні ножі та на 14% більшою ніж ножі із покриттям Зр-1. Отже, евтектичне регенеративне покриття Зр-2 на основі сплаву Fe-Mn-C-B-Si-Cr є ефективним для регенерації ножів рятувальних ножиць та може бути використане для відновлення частин іншої протипожежної техніки та аварійно-рятувального обладнання. Покриття складу Зр-1 також цілком можна застосовувати у цих цілях.

3. Враховуючи хороші зварювальні властивості, відносно невелику вартість та широкий спектр методів нанесення евтектичних регенераційні покриття системи Fe-Mn-C-B-Si-Cr доцільно застосовувати для відновлення зношених деталей (частин) механізованого переносного пожежного інструменту і іншої пожежної техніки та аварійно-рятувального обладнання.

Список літератури:

1. Бережанський Т. Г., Мошкола Я. І. Підвищення ресурсу роботи аварійно-рятувального обладнання евтектичними покриттями. Вісник ЛДУБЖД. 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*. 2016. №29. С. 13-17.

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

5. Бережанський Т. Г., Пашечко М. І. Рентгенівська томографія якості нанесення та дослідження ефективності нанесених регенераційних покриттів для вузлів пожежної техніки та протипожежного обладнання. *Пожежна безпека*. 2022. №41. С. 103-109. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.12

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*. 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*. 2001. Вип. 2. С. 56 – 61.

8. Amiri M., Khonsari M. M. On the Thermodynamics of Friction and Wear - A Review, *Entropy*. 2007. Vol 12, 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*. 2008. Volume 30, Issue 1. P. 9-12. DOI 10.3390/ma13010075.

Reference:

1. Berezhanskyi T., Moshkola Ya. (2019). Improving work resource of safety equipment for eutectic coating. *Visnyk LDUBGD*. Vol 23. P. 36-40. DOI: 10.32447/20784643.20.2019.06.

2. Pashechko M., Kindrachuk M., Humeniuk I., Berezhanskyi T. (2018). Gradient composite coatings for working surfaces of braking devices. *Advances in Science and Technology Research Journal*. Vol. 12. Is. 2 P. 1-5. DOI: 10.12913/22998624/70759.

3. Berezhanskyi T., Bashynskyi O., Boyko T. (2016). "Investigation of the surfacing quality of protective eutectic coatings on the working parts of a fire tool". *"Pozhezhna bezpeka"*, vol. 1, no. 29, pp. 13-17.

4. Berezhanskyi T., Pashechko M. (2021). "Development of coatings for regeneration of fire tools and equipment". *Pozhezhna bezpeka*, no 39. P. 5-11. DOI: 10.32447/20786662.39.2021.01.

5. Berezhans'kyi T.H., Pashechko M.I. (2022). X-ray tomography of the quality of application and investigation of the effectiveness of applied regeneration coatings for firefighting equipment and firefighting equipment. *Pozhezhna bezpeka*. №41. S. 103-109. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.12.

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

7. Holubets V, Bilous O. (2001). 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. (2010) On the Thermodynamics of Friction and Wear - A Review, *Entropy* 12. P. 1021-1049. doi:10.3390/e12051021.

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

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

© Т. Г. Бережанський, М. І. Пашечко, 2023.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 28.11.2023.

Прийнято до публікації 06.12.2023.