

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ  
У РАЗІ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ  
СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ**

**М.С. Агєєв<sup>1</sup>, С.М. Устїнцев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>д.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,  
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

<sup>2</sup>аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,  
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-4352-9479

**Анотація**

**Вступ.** Одним з перспективних напрямків у вирішенні проблеми підвищення довговічності деталей суднових машин та механізмів, схильних до інтенсивного зношування в процесі експлуатації, є газотермічне і, зокрема, газополум'яневе напилення (ГПН) покриттів в процесі відновлювального ремонту. Ефективність процесу ГПН та властивості покриттів значною мірою обумовлені характером процесу руху та нагрівання частинок порошку в газовому струмені. Керуючи швидкістю та температурою частинок шляхом зміни робочого режиму розпилювальних пристроїв, можна наносити покриття з потрібними властивостями. **Мета** статті полягає у встановленні та дослідженні технологічних факторів, що впливають на формування газополум'яневого покриття при відновленні та зміцненні деталей суднових машин та механізмів. **Результати.** Проведені дослідження на етапі формування газополум'яневого покриття дозволили встановити основні технологічні параметри, що суттєво впливають на якість протікання процесу та дослідити багатофазну систему фізико-хімічної взаємодії параметрів формування покриття.

**Висновки.** Визначені основні технологічні параметрами, що впливають на формування газополум'яневого покриття (швидкість польоту напилюваних частинок, дистанція напилення, швидкість руху газів, розповсюдження фронту полум'я тощо). Досліджено взаємозв'язок між динамічними та теплофізичними параметрами формування процесу. З аналізу експериментальних досліджень отримано регресійне рівняння визначення максимальних значень швидкості польоту частинок розміром 40...63 мкм. Для визначення оптимальної дистанції напилення експериментальним шляхом встановлено розподіл температур перерізу, довжини факела полум'я і температуру частинок.

**Ключові слова:** деталі суднових машин та механізмів, відновлювальний ремонт, технологічні параметри, довговічність, газополум'яневе покриття, міцність зчеплення, горюча суміш.

FEATURES OF THE FORMATION OF GAS THERMAL COATINGS  
IN THE RESTORATION OF THE WORKING SURFACES  
OF SHIP EQUIPMENT PARTS

M.S. Ahieiev<sup>1</sup>, S.M. Ustintsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Operation  
of Ship Power Plants,

*Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,*  
ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

<sup>2</sup>Graduate Student at the Department of Operation of Ship Power Plants,

*Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,*  
ORCID ID: 0000-0002-4352-9479

**Summary**

**Introduction.** *One of the promising directions in solving the problem of increasing the durability of parts of ship machines and mechanisms, prone to intensive wear and tear during operation, is gas-thermal and, in particular, gas-flame spraying (GFS) of coatings in the process of restorative repair. The effectiveness of the GFS process and the properties of coatings are largely determined by the nature of the process of movement and heating of powder particles in the gas jet. By controlling the speed and temperature of the particles by changing the operating mode of the spraying devices, it is possible to apply coatings with the desired properties. The purpose of the article is to establish and study the technological factors affecting the formation of gas-flame coating during the restoration and strengthening of parts of ship machines and mechanisms. The results. The conducted research at the stage of gas-flame coating formation made it possible to establish the main technological parameters that significantly affect the quality of the process and to investigate the multiphase system of physical and chemical interaction of coating formation parameters.*

**Conclusions.** *The main technological parameters affecting the formation of the gas-flame coating (the speed of the sprayed particles, the spraying distance, the speed of gas movement, the spread of the flame front, etc.) are determined. The relationship between the dynamic and thermophysical parameters of the formation process was studied. From the analysis of experimental studies, a regression equation was obtained for determining the maximum values of the flight speed of particles with a size of 40...63 microns. To determine the optimal spraying distance, the temperature distribution of the section, the length of the flame torch and the temperature of the particles were determined experimentally.*

**Keywords:** *details of ship machines and mechanisms, restorative repair, technological parameters, durability, gas flame coating, adhesion strength, combustible mixture.*

**Вступ.** Використання газотермічних покриттів для відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей суднових технічних засобів вносить цілий ряд складнощів і має ряд невизначених факторів при прогнозуванні їх властивостей.

Термін служби відновлених деталей визначається якістю ГПН – покриттів, на які істотно впливають цілий ряд параметрів технологічного процесу ГПН: режим наплення (величина струму, тиск і витрата розпилювального газу, дистанція наплення, швидкість переміщення ГПН – апарату); діаметр, хімічний склад

і швидкість подачі порошку; спосіб обробки поверхонь, відновлених ГПН [1]. Вищевказані технологічні параметри визначають чинники, які впливають на кінетику і формування структури відновлених поверхонь деталей суднових технічних засобів [2; 3]. До них відносяться: параметри газотермічного потоку (діаметр, швидкість і температура газу і частинок розпилюваного матеріалу ГПН-покриттів, ступінь їх окислення); склад і властивості несучої середовища і матеріалу покриттів; шорсткість і температура відновлюваної поверхні.

**Постановка проблеми.** З метою підвищення фізико-механічних характеристик відновлюваних поверхонь деталей суднових технічних засобів, що в першу чергу залежить від формування структури ГПН – покриття, в ході дослідження потрібно встановити вплив динамічних та теплофізичних параметрів газопорошкових потоків з метою визначення раціональної дистанції напилання різних порошкових матеріалів. Враховуючи, що основний вплив на щільність покриттів і міцність зчеплення з відновлюваною поверхнею надає ступінь термічної активації матеріалу, що напильється, тому бажано, щоб контакт з поверхнею деталі відбувався в точці максимального нагрівання частинок. Для визначення раціональної дистанції напилання необхідно знати розподіл температур перерізу, довжини факела полум'я і температуру частинок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз інформаційних джерел [4–6] показав, що в усіх процесах ГПН дріт або порошок прискорюється, нагрівається, плавиться або пластифікується, випаровується, утворюючи краплі або пластифіковані частинки, які вступають у хімічну взаємодію з нагрітим газом і навколишнім середовищем і при ударній взаємодії з поверхнею, що обробляється, надзвичайно швидко кристалізуються і охолоджуються, формуючи покриття.

Вміст газів у покритті залежить від температури процесу, наявності легуючих елементів у металі та тиску газу. На будову та властивості покриттів впливають швидкість польоту та температура частинок, час перебування їх у хімічно активному середовищі та її склад [7].

Якщо збільшити швидкість напилання, то підвищиться запас кінетичної енергії частинок, що напильються, яка витрачається на їх деформування і закріплення. Чим менший час окислення частинок, тим менша товщина оксидної плівки. Все це в результаті знижує пористість покриттів і значно підвищує їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості [8].

Якість покриттів залежить від багатьох різних факторів: конструктивних особливостей розпилювача (плазмотрон, газовий пальник тощо.); типу та обсягу витрати застосовуваних газів; потужності джерела живлення; фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей порошоків та флюсів; величини гранул напилуваного матеріалу та значень швидкості його руху; величини дистанції від розпилювача до поверхні деталі, що відновлюється; хімічний склад газів захисної оболонки; методів забезпечення чистоти поверхні, що напильється; системи організації відведення теплоти із зони напилання в період створення покриття, що наноситься, тощо. Тому дослідники вважають, що вивчення особливостей формування ГПН-покриттів є основним напрямком підвищення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

**Формулювання цілей статті.** Мета статті полягає в дослідженні взаємозв'язку динамічних та теплофізичних параметрів, що впливають на формування

ГПН-покриття при відновленні та зміцненні деталей судових машин та механізмів в процесі ремонту.

**Виклад основного матеріалу.** Швидкість руху газів у факелі обумовлена швидкістю поширення фронту полум'я та кількістю виділеної теплової енергії а ході реакції «горючий газ – окислювач». Внаслідок того, що швидкість надходження горючої суміші в зону горіння та швидкість поширення фронту полум'я значно відрізняється за величиною, спостерігається пульсація газопорошкового потоку.

Полум'я поширюється зі швидкістю, що перевищує швидкість газів величину швидкості горіння. Деякий обсяг у зоні ядра згоряє швидше, ніж він знову заповнюється черговою порцією суміші, і таким чином, факел полум'я термічних розпилувачів складається з окремих спалахів, що чергуються. Частота цих пульсацій в ядрі полум'я коливається в межах 0,8...1,4 кГц та факелу 0,1...0,15 кГц для ацетилен-кисневої суміші та відповідно 0,6...1,1; 0,095...0,1 кГц для пропан-бутан-кисневої суміші.

Характер горіння суміші та швидкість руху газів у факелі та ядрі полум'я термічного розпилувального пістолета залежать від співвідношення об'ємів окислювач/горючий газ ( $\beta$ ). При  $\beta_{C_2H_2} = 1,1$  спостерігається стійке горіння, ядро полум'я виражене нечітко, швидкість в факелі на дистанції до 40 мм не перевищує 40 м/с, частота пульсацій полум'я у ядрі 250...300 Гц, у факелі – до 80 Гц (рис. 1). Подальше збільшення  $C_2H_2$  до 2 призводить до збільшення швидкості газів у факелі до 80 м/с і в ядрі до 180 м/с, але при цьому спостерігається зрив полум'я. Найбільш оптимальним є співвідношення  $C_2H_2 = 1,9$ .

Для суміші  $O_2 + C_3H_8 + C_4H_{10}$  збільшення швидкості руху газів у полум'ї зі зростанням значень  $\beta_{C_3H_8}$  відбувається з меншою інтенсивністю. Максимальна швидкість у факелі зафіксована на дистанції 30...40 мм при  $\beta_{C_3H_8} = 4,2$  і становить 70 м/с, у ядрі – 140 м/с.

Швидкість газів у факелі змінюється відповідно до закону затопленого струменя [9] і на відстані 250...300 мм від сопла термічного розпилувального пістолета склала 40 м/с в ацетилен-кисневому полум'ї та 36 м/с у пропан-бутан-кисневому полум'ї (рис. 2), що порівняно зі значеннями швидкостей плазмового струменя на тих же дистанціях для плазмотронів малої потужності.

Для охолодження соплового наконечника розпилувача, зменшення тепловіддачі в атмосферу та підвищення швидкості полум'я застосовується обдув стисненим повітрям.

Встановлено, що обдув (у досліджуваних діапазонах) істотно не впливає на швидкість газів в ядрі полум'я. При збільшенні витрати повітря, що обдуває, до  $3 \times 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с швидкість у факелі зростає на 20 ... 25% для досліджуваних газових сумішей, потім практично не змінюється (рис. 3).

Аналіз результатів експериментальних досліджень швидкостей руху частинок в полум'ї показав, що зі зростанням швидкостей газового потоку збільшується і швидкість частинок, причому це збільшення в пропан-бутан-кисневому полум'ї відбувається дещо інтенсивніше, ніж в ацетилен-кисневому (рис. 4), що обумовлено більшою щільністю першого.

Для дослідження залежності швидкості частинок від питомої маси матеріалу, що напилується, були обрані порошки сплаву, що самофлюсується ПГ-12Н-01,

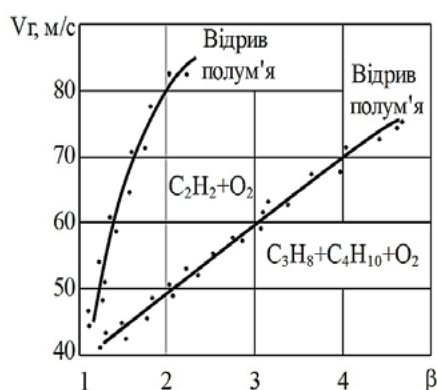


Рис. 1. Вплив співвідношення окислювач /робочий газ ( $\beta$ ) на швидкість руху газів у факелі полум'я термічного розпилювача

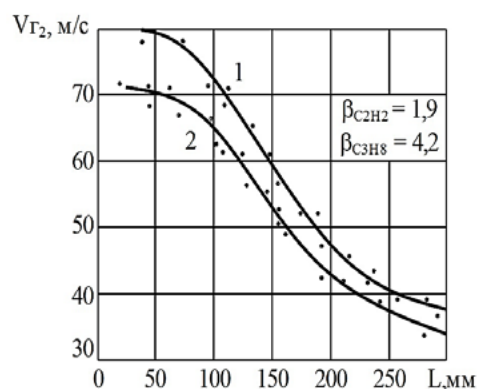


Рис. 2. Зміна швидкості руху газів за довжиною факела ацетилен-кисневого (1) та пропан-бутан-кисневого (2) полум'я

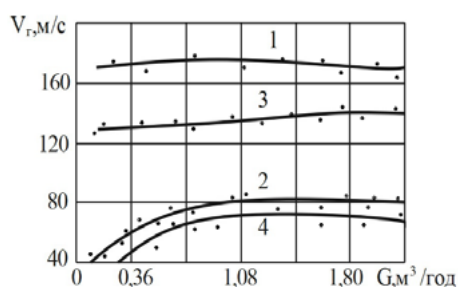


Рис. 3. Вплив витрати обдувального газу (повітря) на швидкість газів у ядрі (1, 3) та факелі (2, 4) полум'я ацетилен-кисень (1, 2) та пропан-бутан-кисень (3, 4)

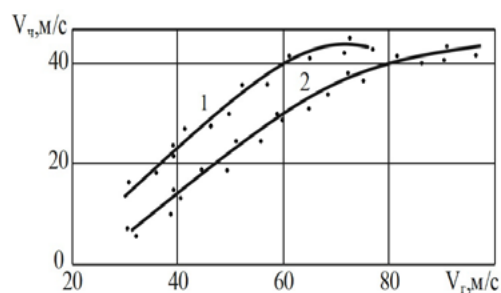


Рис. 4. Залежність швидкості польоту частинок сплаву ПГ-12Н-01 від швидкості руху газів у факелі пропан-бутан-кисневого (1) та ацетилен-кисневого (2) полум'я

бронзи БрОФ10-1, з розміром частинок 50...63 мкм. Витрати газів, м<sup>3</sup>/год: пропан-бутан – 0,9; кисень – 3,5; стиснене повітря – 0,5. Продуктивність напилення по порошку ПГ-12Н-01 становила 10 кг/год.

Зі збільшенням питомої маси матеріалу порошку зменшується прискорення та швидкість польоту частинок, підвищується відстань від соплового наконечника до точки, в якій частинки мають максимальну швидкість (рис. 5). Аналогічні результати отримані на ацетилен-кисневій суміші, причому швидкість польоту частинок на 15 ... 20% вище, ніж у пропан-бутан-кисневому полум'ї.

Припинення обдування струменя стисненим повітрям знижує величину максимальної швидкості частинок сплаву ПГ-12Н-01 – до 30 м/с.

Частки порошку, що напилюються, в потоці газу набувають прискорення під дією сили в напрямку вектору відносної швидкості газ-частка. Далі за рахунок зниження швидкості газів по довжині полум'я знижується відносна швидкість, і на відстані 75 ... 2000 мм для досліджуваних матеріалів прискорення дорівнює нулю.

Оцінку сили, що діє на сферичну частинку, можна зробити, використовуючи вираз, запропонований в роботі [10]:

$$F_{\text{ч}} = \frac{C_d \rho_r V_{\text{ч}}^2 d_0^2}{8}, \quad (1)$$

де  $d_0$  – діаметр частинки, мм;

$\rho_r$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ч}}$  – швидкість частки, м/с;

$C_d$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, що визначається у разі  $0,15 < R_e < 500$  з рівняння:

$$C_d = \frac{23,707}{R_e} \left( 1 + 0,165 R_e^{\frac{2}{3}} - 0,05 R_e^{0,1} \right). \quad (2)$$

З (1) і (2) отримаємо вираз визначення прискорення частки:

$$a_{\text{ч}} = \frac{3 \rho_r V_{\text{ч}}^2}{4 \rho_{\text{ч}} d_0 R_e} \times 23,707 \times \left( 1 + 0,165 R_e^{\frac{2}{3}} - 0,05 R_e^{0,1} \right), \quad (3)$$

де  $\rho_{\text{ч}}$  – щільність матеріалу частки, кг/м<sup>3</sup>.

Використовуючи вираз (3) і приймаючи  $R_e = 50 \dots 100$ , було отримано значення прискорення  $a_{\text{ч}} = (3,9 \dots 6,5) \times 10^3$  м/с<sup>2</sup>, що відповідає значенням  $a_{\text{ч}}$ , отриманим під час експерименту (рис. 5) і рівним  $\sim 5 \times 10^3$  м/с<sup>2</sup>.

Оцінка впливу гранулометричного складу на швидкість польоту частинок у факелі здійснювалася з використанням порошоків сплаву ПГ-12Н-01 та бронзи БрОФ10-1, розділених по фракціях за допомогою приладу ситового аналізу. Встановлено, що збільшення розміру частинок бронзи від 50 до 160 мкм знижує максимальне значення швидкості польоту з 32 до 24 м/с, частинок сплаву ПГ-12Н-01 – з 40 до 27 м/с (рис. 6).

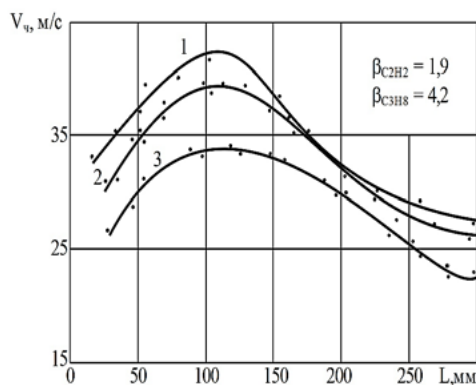


Рис. 5. Зміна швидкості польоту частинок по довжині факела пропан-бутан-кисневого 1,2 та ацетилен-кисневого 3 полум'я: 1 – сплав ПГ-12Н-01; 2, 3 – бронза БрОФ10-1

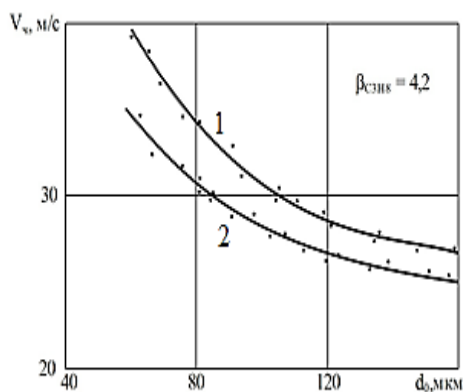


Рис. 6. Залежність максимальної швидкості польоту частинок порошоків від їх розміру: 1 – сплав ПГ-12Н-01; 2 – бронза БрОФ10-1

При цьому максимум швидкості зміщується у бік великих дистанцій (рис. 7). З аналізу експериментальних досліджень отримано регресійне рівняння

визначення максимальних значень швидкості польоту частинок розміром 40...63 мкм:

$$A_u = V_r - A \times \rho_u^\alpha,$$

де  $V_r$  – максимальна швидкість газів у факелі полум'я, м×с<sup>-1</sup>;

$$A = 2,206 \times 10^{-2} \text{ м}^{1,948} \text{ кг}^{-0,316} \text{ с}^{-1};$$

$$\alpha = 0,316.$$

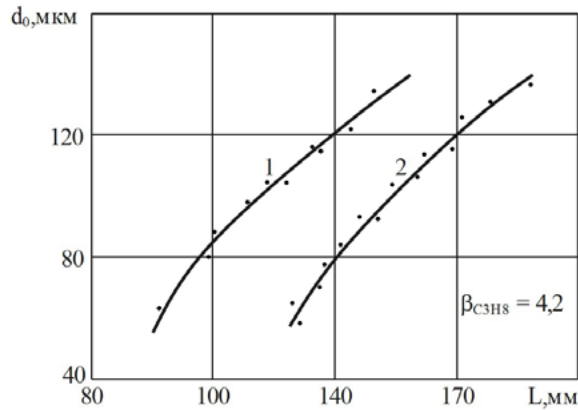


Рис. 7. Вплив розміру частинок напилюваного матеріалу на дистанцію, що відповідає максимальній швидкості польоту частинок сплаву ПГ-12Н-01 (1) та бронзи БрОФ10-1 (2)

Таким чином, максимальні швидкості руху мають дрібніші частинки порошків (40...63 мкм), і їх краще використовувати при напиленні на внутрішні поверхні порожнистих деталей, оскільки в даному випадку дистанція напилення обмежена розмірами виробу.

**Висновки.** Отримані залежності і результати експериментальних досліджень ЕДН були спрямовані на вирішення завдання управління параметрами газопорошкового потоку: швидкістю газу і напилюваних частинок, гранулометричним складом частинок, властивостями частинок і несучого середовища з метою отримання високих фізико-механічних і експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь і збільшення терміну служби деталей суднових технічних засобів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ageev M.S., Chernovol M.I. Smirnova T.V. Study of the spraying process and the influence of its factors on the properties of electric arc spraying coatings. Modern questions production and repair in industry and in transport: materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar (March 23–29, 2020, Tbilisi, Georgia). Kyiv, 2020. P. 201–205.
2. Агеев М.С., Білоцерківський М.А., Лопата В.М. Використання структурних аномалій в сталевих газотермічних покриттях при підвищенні зносостійкості засобів транспорту. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. Технічні науки. 2020. № 4. Том 1(287). С. 257–262. doi:10.31891/2307–5732.

3. Ageev M.S., Golovashchuk M.V. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту шляхом керування факторами процесу електродугового напилення багатофункціональних покриттів *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки*. 2019 № 3(273). С. 240–248. doi: 10.31891/2307–5732.
4. Ahieiev, M., Gritsuk, I., Litikova, A. 2021. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2021-01-5100.
5. Ageev M., Dovzhuk S., Nikolaychuk V. The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2019. Col.1(32). P. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.32515/2664-262X>.
6. R. Unger, V. Belaschenko, W. Kratochvil A new arc spray system to spray high density, low oxides coatings. Thermal spray: Proceeding of the 15<sup>th</sup> International conference. Edited by Coddet. Nice: 1998. P. 1989–1995.
7. Лопата Л.А. Дослідження відновлення автомобільних деталей типу «вал» електродуговою металізацією. «Констр, и технология производства с/х машин» : Збірн. наук. праць. Кіровоград, 2005. Вип. № 35. С. 409–416.
8. Tomie Michio, Abf Nobuyuki, Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting. Trans. JWRI. 1992. 21, № 2. С. 229–300.
9. Ageev M.S., Рудковський А.В., Грищенко О.П. Відновлення деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки*. 2020. № 3(285). С. 268–277. DOI 10.31891/2307–5732.
10. Lopata L., Smirnova T. Of combined electric arc coatings. *International Scientific Journal Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24, № 3/93. P. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61>.

#### REFERENCES

1. Ageev M.S., Chernovol M.I. Smirnova T.V. (2020). Study of the spraying process and the influence of its factors on the properties of electric arc spraying coatings. Modern questions production and repair in industry and in transport: materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar (March 23–29, 2020, Tbilisi, Georgia). Kyiv : 201–205.
2. Ageev M.S., Bilotserkivskyi M.A., Lopata V.M., Vigilyanska N.V. (2020) The use of structural anomalies in steel gas-thermal coatings to increase the wear resistance of vehicles [Vykorystannya strukturnykh anomalii v stalevykh hazotermichnykh pokryttyakh pry pidvyshchenni znosostiykosti zasobiv transportu]. Scientific journal "Bulletin of Khmelnytskyi National University". Technical sciences. No. 4. Volume 1 (287), 257–262. doi:10.31891/2307–5732.
3. Ageev M.S., Golovashchuk M.V. (2019) Improving the operational properties of parts of means of transport by controlling the factors



- of the process of electric arc spraying of multifunctional coatings [Pidvyshchennya ekspluatatsiynykh vlastyvostry detaley zasobiv transportu shlyakhom keruvannya faktoramy protsesu elektroduhovoho napylennya bahatofunktsional'nykh pokryttiv] Scientific journal "Bulletin of the Khmelnytskyi National University". Technical sciences. No. 3 (273). 240–248. doi: 10.31891/2307–5732.
4. Ahieiev, M., Gritsuk, I., Litikova, A., Bilousov, I., Vrublevskyi, R., Boboshko, O., Smyrnov, O., Saraieva, I., Khudiakov, I., Pohorletskyi, D., (2021). Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2021-01-5100.
  5. Ageev M., Dovzhuk S., Nikolaychuk V. (2019) The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Col.1(32). 114–122. DOI: <https://doi.org/10.32515/2664-262X>.
  6. Unger R., Belaschenko V., Kratochvil W. (1998) A new arc spray system to spray high density, low oxides coatings. Thermal spray: Proceeding of the 15<sup>th</sup> International conference. Edited by Coddet. Nice: 1989–1995.
  7. Lopata L.A. (2005) Research on restoration of «shaft» type automobile parts by electric arc metallization [Doslidzhennya vidnovlennya avtomobil'nykh detaley typu «val» elektroduhovoyu metalizatsiyeyu] «Construction and production technology of agricultural machines»: Collection. of science works Kirovohrad: Issue No. 35.409–416.
  8. Michio T., Nobuyuki A. (1992) Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting. Trans. JWRI. 21, № 2. 229–300.
  9. Ageev M.S., Rudkovskyi A.V., Hryshchenko O.P., Solovyh E.K., Magopets S.O. (2020) Restoration of parts of means of transport by the combined method of application of multifunctional coatings [Vidnovlennya detaley zasobiv transportu kombinovanyim metodom nanesennya bahatofunktsional'nykh pokryttiv] Scientific journal «Bulletin of Khmelnytskyi National University». Technical sciences. № 3 (285). 268–277. DOI:10.31891/2307–5732.
  10. Lopata L., Smirnova T. (2019) Of combined electric arc coatings. International Scientific Journal Problems of Tribology. Vol. 24, № 3/93. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61>