

*ТУЛУПОВ В.І., ОНИЩУК С.Г.***ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ СПОСОБІВ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБІВ**

Досліджено використання комбінованих способів обробки для забезпечення життєвого циклу виробів машинобудування. Доведено доцільність використання як джерела тепла імпульсного електричного струму для реалізації процесу алюмотермічного зміцнення. Використання імпульсного електричного струму дозволяє отримати дискретні покриття, що збільшують життєвий цикл виробів. Визначено умови початку процесу алюмотермії; експериментально підтверджено доцільність використання оксиду хрому для синтезу оксиду алюмінію. Металографічні дослідження підтвердили наявність в поверхневому шарі хрому та алюмінію після алюмотермії. Зносостійкість дискретного покриття досліджено на спеціальному устаткуванні за методикою випробувань на машині тертя. Дискретне покриття, отримане після алюмотермії, має зношення менше у 2,3 рази, зносостійкість більше у 2 рази, інтенсивність зношення менше у 1,8 рази. Використання комбінованих способів в технологічному процесі дозволяє зменшити виробничий цикл за рахунок зменшення кількості технологічних операцій.

Ключові слова: життєвий цикл, зносостійкість, комбіновані способи обробки, алюмотермія.

TULUPOV V.I., ONYSHCHUK S.G.**USE OF COMBINED PROCESSING METHODS TO ENSURE THE LIFE CYCLE OF PRODUCTS**

The use of combined processing methods to ensure the lifecycle of engineering products has been investigated. The feasibility of using pulse electric current as a heat source for implementing the aluminothermic strengthening process has been substantiated. The use of pulse electric current enables the attainment of discrete coatings, thereby enhancing the product lifecycle. The initiation conditions of the aluminothermy process have been identified; the feasibility of using chromium oxide for aluminum oxide synthesis has been experimentally confirmed. Metallographic studies have confirmed the presence of chromium and aluminum in the surface layer after aluminothermy. The wear resistance of the discrete coating has been examined using specialized equipment according to the friction machine testing methodology. The discrete coating obtained after aluminothermy exhibits a wear reduction of 2.3 times, a wear resistance increases of 2 times, and a wear intensity decrease of 1.8 times. The utilization of combined methods in the technological process allows for a reduction in the production cycle by reducing the number of technological operations.

Keywords: life cycle, wear resistance, combined processing methods, aluminothermy

1. Вступ. Одним з головних завдань машинобудівної галузі є забезпечення якості виробів, що виготовляються, протягом життєвого циклу. Одним з важливих етапів життєвого циклу є виробництво [1]. Саме на цьому етапі формуються показники якості виробу, що в подальшому сприятимуть експлуатації протягом тривалого періоду. Це завдання може бути вирішено використанням зміцнювальних методів обробки [2].

Серед методів зміцнення останнім часом набули поширення комбіновані методи [3], до яких належать хімічні та хіміко-термічні (цементування, азотування, нітроцементация), термічні (гартування струмами високої частоти), обробка виробів концентрованими потоками енергії (пучки електронів, плазмові потоки, лазерне випромінювання), механічні (поверхнево-пластичне деформування) та ін.

Особливістю комбінованих методів обробки можна відзначити те, що їх використання дозволяє отримати на поверхні деталі зміцненого шару на етапі виробництва, що суттєво покращить експлуатаційні властивості та життєвий цикл [4]. Вибір того чи іншого методу зміцнення серед комбінованих методів визначається такими чинниками, як:

- енергоємність процесу зміцнення;
- характеристики покриття (зносостійкість, глибина зміцненого шару, твердість, величина залишкових напруг в поверхневому шарі).

Перший з чинників – енергоємність процесу зміцнення – може вплинути на загальну енергоємність технологічного процесу виготовлення виробу. Для зменшення енергоємності процесів механічної обробки в машинобудуванні використовують додаткові джерела тепла. Ідеальне штучне джерело тепла, що застосовується у технологічному методі поверхневого зміцнення, повинно забезпечувати швидкісне нагрівання металу, піддаватися контролю та регулюванню в строго нормованих дозах в одиницю часу, забезпечувати широкий діапазон температур.

Другий чинник – характеристики покриття – визначають експлуатаційні показники виробу.

Таким чином, дослідження використання комбінованих способів на етапі виробництва є актуальним.

2. Мета дослідження. Дослідження комбінованих способів обробки деталей з метою забезпечення життєвого циклу.

3. Викладення основного матеріалу та результати. Для вибору того чи іншого джерела живлення для реалізації комбінованих методів зміцнення важливим є енергоємність процесу.

Серед відомих джерел тепла найменші витрати енергії (питомі витрати енергії) спостерігаються при використанні електричних джерел тепла (менше 1 Дж/см³), а найбільші – при використанні плазмово-механічних (4,5 Дж/см³) та лазерно-механічних джерел тепла (більше 6,5 Дж/см³) [5]. Тому як джерело тепла використовується імпульсний електричний струм.

Серед існуючих комбінованих методів зміцнювальної обробки хіміко-термічна обробка поєднує в собі хімічний та термічний вплив, що сприяє зміні складу, структури та властивостей поверхневого шару оброблюваних деталей. До хіміко-термічної обробки належить й метод поверхневого зміцнення деталей з використанням алюмотермії [6].

Алюмотермічний процес полягає в виділенні значної кількості тепла через відновлення оксидів металічних елементів. Температура процесу алюмотермії може досягати до 2500 °С. В роботі [7] описано процес алюмотермії, що проводиться в вакуумі з використанням спеціального обладнання. Авторами досліджено різні реакції синтезу оксиду алюмінію, зокрема $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3$ та $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$. Відзначається, що використання оксиду заліза для синтезу оксиду алюмінію економічно недоцільно порівняно з оксидом хрому.

Для дослідження прийнято варіант окислення оксиду хрому для синтезу оксиду алюмінію. Реакція алюмотермічного відновлення Cr_2O_3 починається при температурі понад 1400 °С та при 1600 °С завершується практично повністю [8].

Для розрахунку необхідної сили струму для забезпечення температури початку та підтримки процесу алюмотермії, використовувався програмний комплекс ANSYS (рис. 1), який базується на методі кінцевих елементів, а саме, модуль Workbench, оскільки він дозволяє вирішувати термоелектричні задачі.

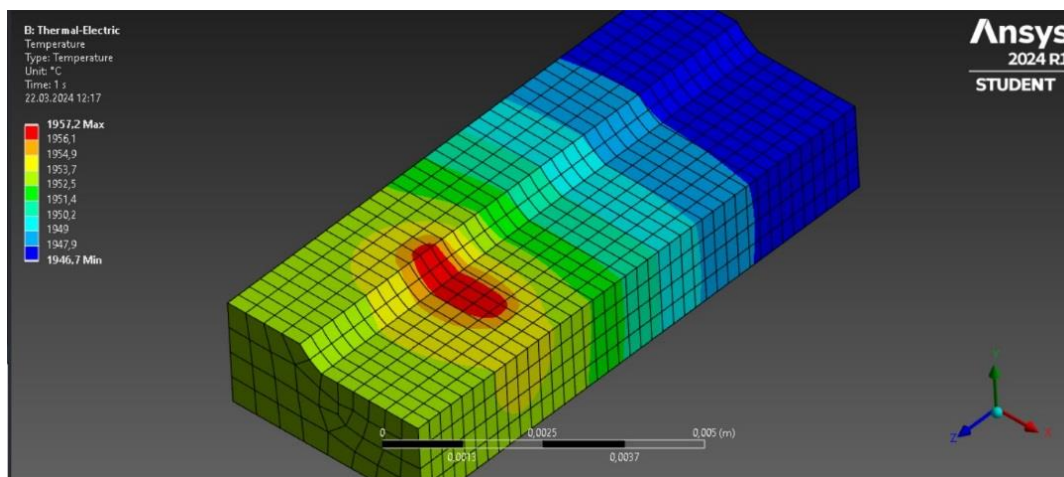


Рис. 1 – Модель теплових полів при алюмотермії

В результаті моделювання визначено, що для забезпечення процесу алюмотермії сила імпульсного електричного струму повинна дорівнювати $I = 125\text{--}130$ А.

Як було відзначено, другим важливим чинником, що визначає якість виробів та впливає на життєвий цикл, є вид покриття. Особливістю дискретних покриттів є те, що вони є зміцненими окремими ділянками, що розташовані на робочих поверхнях деталей з визначеною суцільністю.

Дискретні покриття збільшують зносостійкість поверхонь тертя за рахунок ефективного використання явища структурно-енергетичної пристосованості матеріалів при терті шляхом створення архітектури поверхні тертя, що зберігає фрагменти руйнування вторинних структур.

Наявність в поверхневому шарі дискретних ділянок підвищеної твердості, оптимальної суцільності, геометрії та глибини проникнення в поверхню усуває концентрацію напружень від контактних навантажень та перериває процес тріщиноутворення, пластичного деформування, а також зменшує схильність до тужавіння деталей.

З практики машинобудування відомо, що після нанесення покриття наявність залишкових напружень стискування є позитивним фактом, який сприяє зменшенню крихкості. При наявності в покритті значних залишкових напружень стискування в процесі навантаження системи основа-покриття (до початку збільшення пластичних деформацій) розтріскування покриття не спостерігається [9].

Дискретне покриття виключає відокремлення покриття, збільшує його зносостійкість, тому що дискретна структура покриття обмежує його локальне перенапруження, яке є причиною зношення традиційних покриттів. Дискретне покриття має менші мікронапруження, чим при нанесенні суцільним шаром. Ці особливості дискретних покриттів мають важливе значення для забезпечення життєвого циклу виробів.

Для визначення параметрів дискретного покриття використовується залежність для розрахунку критичного кроку тріщини:

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left(0,1 + \frac{\sigma_n^{ocm}}{\varepsilon_k} \frac{1}{E_n} \right) \quad (1)$$

де σ_n^{ocm} – залишкові напруження в покритті, МПа; ε_k – критична деформація основи під дією зовнішнього навантаження, Н; E_n – модуль пружності покриття, МПа.

Реалізація методу алюмотермічного відновлення оксиду алюмінію здійснювалась за допомогою генератора імпульсного струму. Використання імпульсного струму забезпечує формування регулярної дискретної структури у вигляді зміцнених фрагментів.

Розташування зміцнених фрагментів залежить від частоти та тривалості імпульсів струму, режимів оброблення (частоти обертання та поздовжньої подачі електрода-інструмента).

Тривалість імпульсів визначається залежністю [10]

$$\tau = \frac{60 \cdot C_n}{\pi \cdot D \cdot n} \cdot K, \quad (2)$$

де C_n – довжина зміцненого фрагменту (визначається за формулою (1)), мм; D – діаметр поверхні оброблюваної деталі, мм; n – частота обертів шпинделя, хв^{-1} ; K – коефіцієнт, який залежить від матеріалу оброблювальної заготовки, щільності струму при пропусканні його через зону різання та швидкості різання.

Частота імпульсного струму f , що забезпечує періодичність утворення зміцнених фрагментів, визначається залежністю

$$f = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot (C_n + l)}, \quad (3)$$

де l – відстань між зміцненими фрагментами, мм.

Експериментальні дослідження алюмотермічного відновлення виконувались на зразках, виготовлених зі сталі 40ХН (ДСТУ 7806:2015). Для досліджень використовувався токарно-гвинторізний верстат мод.1К625. Перед початком експериментів зразок має шорсткість поверхні $Ra=2,5$ мкм. При виконанні експериментальних досліджень на поверхню зразка наноситься шар завтовшки 0,5-1 мм суміші оксиду хрому Cr_2O_3 , металевого порошку алюмінію Al та зв'язувальної речовини.

Електрод-інструмент ізолюється текстолітовими прокладками та закріплюється в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата. Дослідний зразок закріплюється в трикулачковому патроні й отримує обертання з частотою 63 хв^{-1} . Електрод-інструмент отримує поздовжню подачу зі швидкістю 2 мм/хв.

Від генератора імпульсного струму подається імпульсний електричний струм силою 128 А напругою 12 В. В результаті виникає електрична дуга, що ініціює процес алюмотермії (рис. 2). Зазор між електродом та поверхнею дослідного зразка залишається в межах 0,1-0,15 мм.

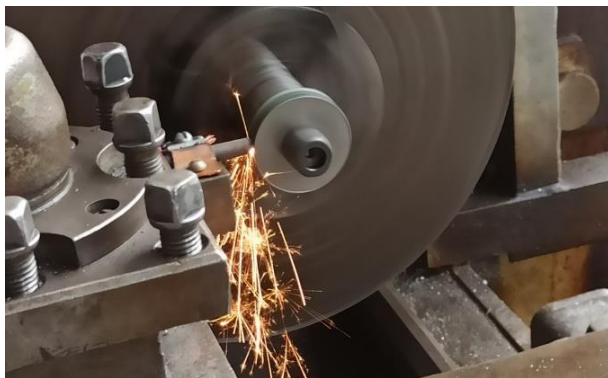


Рис. 2 – Реалізація алюмотермічного відновлення

Для дослідження отриманого покриття виконано металографічні дослідження. Результати рентгенофлуоресцентного та спектрального аналізів свідчать про насичення зміцненого шару зразка хромом (10,94%) та алюмінієм (6,1%) після алюмотермії. У макроструктурі металу зразка тріщин, раковин, пор, неметалевих включень та інших дефектів металургійного характеру не виявлено.

Рівень мікротвердості визначено на мікротвердоміром ПМТ-3 при навантаженні 25 г. Результати вимірів мікротвердості наведені на рис. 3.

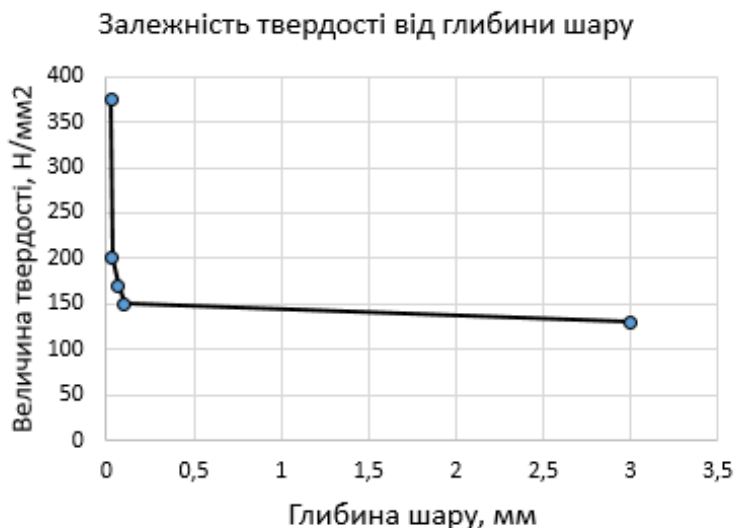


Рисунок 3 – Залежності розподілення мікротвердості по глибині поверхневого шару після зміцнення методом алюмотермії

Аналіз вимірювання мікротвердості свідчить про те, що глибина зміцненого шару становить 0,1 мм. Мікротвердість зміцненого шару становить: на глибині 0,025 мм від поверхні зразка - $370 \div 380 \text{ Н/мм}^2$; на глибині 0,03 мм – 200 Н/мм^2 ; на глибині 0,07 мм – 170 Н/мм^2 ; на глибині 0,1 мм – 150 Н/мм^2 . Мікротвердість основного металу становить 130 Н/мм^2 .

Однією з важливих характеристик дискретного покриття, що забезпечує збільшення життєвого циклу виробу, є його зносостійкість. Для експериментального дослідження зносостійкості дискретного покриття, отриманого в результаті алюмотермічного відновлення, було використано метод «штучних баз».

Експериментальні дослідження зносостійкості виконували з використанням спеціального устаткування за методикою випробувань на машині тертя виконувалось за схемою «диск-колодка». Як контртіло використовувався бархатний напилек ($25 \text{ зубців на } 1 \text{ см}^2$), виготовлений з інструментальної вуглецевої сталі У13А й твердістю 54–58 HRC.

Дослідний зразок випробувався на зношення в парі з колодкою при заданому навантаженні $G = 1000 \text{ Н}$, частоті обертання $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$ та умовах тертя (сухе тертя). Досліджувалась зміна розмірів отворів, зроблених на торцевій поверхні зразка, при випробуваннях зносостійкості. Розрахунки зносостійкості J_s (км/мм) та інтенсивності зношення V_i (мм/км) виконувались за формулами [11]:

$$J_{Si} = \frac{\pi D n t_i}{1000 \Delta_i}, \quad (4)$$

$$V_i = \frac{1}{J_{Si}}, \quad (5)$$

де D – діаметр дослідного зразка (мм); n – частота обертання, хв^{-1} ; t_i – час випробування, хв.; Δ_i – зношення поверхні.

Результати досліджень свідчать про те, що після 15 хв. випробування величина зношення менше у 2,3 рази, зносостійкість більше у 2 рази, інтенсивність зношення менше у 1,8 разів у зразків, що зміцнені методом алюмотермії.

Авторами проведено низку досліджень щодо розроблення та запровадження технологічного процесу виготовлення ступінчастих валів з використанням алюмотермічного зміцнення. Зокрема, для обробки ступінчастого вала, виготовленого зі сталі 40ХН, запропоновано в технологічному процесі як окремі технологічні переходи токарно-гвинторізної операції алюмотермічне зміцнення. Це дозволить зменшити трудомісткість та собівартість виготовлення деталі за рахунок виключення термічної та круглошліфувальної операції.

Висновки.

Використання комбінованих методів зміцнення дозволяє забезпечити збільшення життєвого циклу виробів. Досліджено застосування алюмотермічного зміцнення поверхонь досліджуваних зразків, зокрема визначено режими використання імпульсного електричного струму як джерела живлення та металографічні дослідження зміцненого поверхневого шару. Використання методу «штучних баз» дозволяє суттєво зменшити

трудомісткість досліджень зносостійкості. Результати досліджень свідчать про те, що після 15 хв. випробування величина зношення менше у 2,3 рази, зносостійкість більше у 2 рази, інтенсивність зношення менше у 1,8 разів у зразків, що зміцнені методом алюмотермії. Запровадження технологічних переходів алюмотермічного зміцнення токарно-гвинторізної операції дозволить зменшити тривалість технологічного циклу за рахунок зменшення технологічних операцій.

Список літератури:

1. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / С.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітько. – Полтава, 2019. – 201 с.
2. Ющенко К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: НВП «Вид-во Наукова думка» НАН України, 2007. – 558 с.
3. Серета Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів: монографія / Б.П. Серета, Н.Є. Калініна, І.В. Кругляк. Запоріжжя: ЗДІА, 2004. – 230 с.
4. Фесенко А.Г. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посібник. / А.Г. Фесенко, К.В. Бечке, С.В. Манжалівський. - Дніпро: РВВ ДНУ, 2015. - 104 с.
5. Тулупов В., Онищук С. Використання енергозберігаючих технологій у важкому машинобудуванні // Технічні науки та технології. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – № 4(30). – С. 24–30. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-24-30](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-24-30).
6. Губарь Е.Я. Технология получения покрытий на основе Al_2O_3 с улучшенным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств / Е.Я. Губарь, А.М. Пономаренко, И.П. Частоколенко, В.Ю. Шматов, В.Ю. Васильченко // Нові матеріали та технології в машинобудуванні. – 2014. – №2. – С. 41-44.
7. Wenzel B.M. Aluminothermic reduction of Cr_2O_3 contained in the ash of thermally treated leather waste / B.M. Wenzel, T.H. Zimmer, C.S. Fernandez, N.R. Marcilio, M. Godinho // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 30. – №1. – PP. 141-154.
8. Сівак О.А. Особливості утворення тугоплавких фаз в системі $Al-Cr_2O_3-B_2O_3$ / О.А. Сівак, М.І. Чередник, І.М. Тоцький, О.Ю. Попов, В.А. Макара // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 15. – №4. – 2014. – С. 780-783.
9. Ляшенко Б.А. Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры. Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием / Б.А. Ляшенко, Ю.В. Волков, Е.К. Соловых, Л.А. Лопата // Проблемы тертя та зношування. – 2015. - №2 (67). – С. 110-126.
10. Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монографія / Ковалевський С. В., Тулупов В. І. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 100 с.
11. Тулупов В., Онищук С. Дослідження методу поверхневого зміцнення деталей із використанням алюмотермії // Технічні науки та технології. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 2(24). – С. 17-22. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-17-22](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-17-22).

References (transliterated)

1. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V., Hnitko, S.M. (2019). Tekhnologichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia. Poltava. 201 s. [in Ukraine].
2. Yushhenko K.A. Inzheneriya poverxni / K.A. Yushhenko, Yu.S. Borysov, V.D. Kuznecov, V.M. Korzh. – K.: NVP «Vyd-vo Naukova dumka» NAN Ukrayiny, 2007. – 558 s. [in Ukraine]
3. Sereta B.P. Poverxneve zmicznennya materialiv: monografiya / B.P. Sereta, N.Ye. Kalinina, I.V. Kruglyak. Zaporizhzhya: ZDIA, 2004. – 230 s. [in Ukraine]
4. Fesenko A.G. Metody poverxneвого zmicznennya u procesi vygotovlennya detalej mashyn : navch. posibnyk. / A.G. Fesenko, K.V. Bechke, S.V. Manzhaliyivskiy. - Dnipro: RVV DNU, 2015. - 104 s. [in Ukraine]
5. Tulupov V., Onyshhuk S. Vykorystannya energozberigayuchykh texnologij u vazhkomu mashynobuduvanni // Texnichni nauky ta texnologiyi. – Chernigiv: NU «Chernigivska politexnika», 2022. – № 4(30). – S. 24–30. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-24-30](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-24-30). [in Ukraine]
6. Gubar E.Ya. Tehnologiya polucheniya pokrytity na osnove Al_2O_3 s uluchshennyim kompleksom fiziko-mehaniicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv / E.Ya. Gubar, A.M. Ponomarenko, I.P. Chastokolenko, V.Yu. Shmatkov, V.Yu. Vasilchenko // Novi materialy ta texnologiyi v mashynobuduvanni. – 2014. – №2. – S. 41-44. [in Ukraine]
7. Wenzel B.M. Aluminothermic reduction of Cr_2O_3 contained in the ash of thermally treated leather waste / B.M. Wenzel, T.H. Zimmer, C.S. Fernandez, N.R. Marcilio, M. Godinho // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 30. – №1. – PP. 141-154.
8. Sivak O.A. Osoblyvosti utvorennia tugoplavkykh faz v systemi $Al-Cr_2O_3-B_2O_3$ / O.A. Sivak, M.I. Cherednyk, I.M. Toczkyj, O.Yu. Popov, V.A. Makara // Fizyka i ximiya tverdogo tila. – T. 15. – №4. – 2014. – S. 780-783. [in Ukraine]
9. Lyashenko B.A. Povishenie iznosostoikosti detalei sudovikh mashin i mekhanizmov pokrytityami diskretnoi strukturi. Tekhnologicheskoe obespechenie pokrititi diskretnoi strukturi elektrokontaktym pripekaniem / B.A. Lyashenko, Yu.V. Volkov, Ye.K. Solovikh, L.A. Lopata // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2015. – №2 (67). – С. 110-126. [in Ukraine]
10. Specialni metody obroblyennya robochyx poverxon detalej mashyn : monografiya / Kovalevskiy S. V., Tulupov V. I. – Kramatorsk : DDMA, 2012. – 100 s. [in Ukraine]
11. Tulupov V., Onyshhuk S. Doslidzhennya metodu poverxneвого zmicznennya detalej iz vykorystannyam alyuotermiyi // Texnichni nauky ta texnologiyi. – Chernigiv : NU «Chernigiv'ska politexnika», 2021. – № 2(24). – S. 17-22. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-17-22](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-17-22).

Поступила (received) 06.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Тулупов Володимир Іванович (Volodymyr Tulupov) – кандидат технічних наук, доцент кафедри інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3951-364X>; тел.: (093) 137-07-43. e-mail: wladimir.tulupov@gmail.com.

Онищук Сергій Григорович (Serhii Onyshchuk) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8157-6869>; тел.: (093) 636-61-43; e-mail: onishchuk65@gmail.com.