УДК 621.9.048.4 DOI: 10.18372/0370-2197.3(100).17895

О. О. СКВОРЦОВ, О. О. МІКОСЯНЧИК

Національний авіаційний університет, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ВПЛИВУ АБРАЗИВУ

Проаналізовано причини руйнування деталей вузлів тертя повітряних суден і наземної авіаційної техніки, які виготовлені із сплавів на основі заліза, встановлено, що при експлуатації на їх робочих поверхнях розвиваються різноманітні процеси, а саме: абразивного зношування, схоплення, фретинг-корозії, втомного зношування. Проведено аналіз сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення деталей машин, визначено перспективність електроіскрового легування (ЕІЛ) сплавів на основі заліза. Дослідження зносостійкості покриттів проводили за комплексною методикою, що включає металографічний, електронно-мікроскопічний, дюрометричний та інші методи аналізу фізико-механічних методів. Встановлено вплив матеріалів електрода на зносостійкість ЕІЛ покриттів. Зазначено практичні рекомендації для поверхневого зміцнення деталей авіаційної техніки, що працюють в умовах абразивного зношування.

Ключові слова: *працездатність; покриття; зношування; абразив; зносостійкість.*

Вступ. Забезпечення надійності і довговічності конструкційних елементів повітряних суден (ПС) і авіаційної наземної техніки на сьогодні є першочерговим завданням, при вирішенні якого необхідно враховувати їх зв'язок з працездатністю вузлів тертя. Багаторічний досвід експлуатації і ремонту авіаційної техніки (АТ) та технічних засобів, які її обслуговують, показав, що у більшості випадків їх працездатність залежить від зносостійкості деталей вузлів тертя.

Одним із напрямків забезпечення експлуатаційної надійності технічних систем є використання і розроблення нових сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення металів та сплавів.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Через різні умови навколишнього середовища та експлуатації ПС піддаються зносу. Конструктивні компоненти, шасі, двигуни та інші системи повинні проходити регулярне технічне обслуговування, забезпечуючи безпечний політ ПС. Вирішенню проблеми забезпечення працездатності деталей вузлів тертя авіаційної техніки присвячені роботи багатьох вітчизняних [1-6] та зарубіжних дослідників [7, 8].

Незважаючи на те, що використання передових композиційних матеріалів у ПС постійно збільшується, металеві матеріали становлять 45% від загальної ваги (20% алюмінію, 15% титану та 10% сталі) Boeing 787, Airbus A350 має подібний розподіл матеріалів: 20% Al, сплави Al–Li, 14% титану та 7% сталі за вагою [9]. Алюміній використовується в передніх кромках крил і хвоста; титан в основному використовується для деталей двигуна та кріплень, використання сталі переважає в шасі, передній кромці крил, пілонах двигуна, петлях, тросах, кріпленнях тощо. В таблиці 1 представлено основні види пошкоджень ПС.

Встановлено [11], що одним із катастрофічних видів зношування є абразивне зношування. Цей вид зношування притаманний деталям шасі ПС, золотниковим парам, гвинтам та іншим деталям авіаційної техніки. В роботі [12] зазначено, що

шасі часто піддається зносу, руйнуванню, механічним пошкодженням і ерозії, головним чином спричиненими зіткненням з піском та іншими дрібними частинками, що призводить до деформації та видаленню матеріалу з подальшим зниженням його експлуатаційної ефективності.

Таблиця 1

Кількість відмов у компонентах повітряних суден [10]

Тип пошкоджень	Відсоток (%) відмов
Втома	55–61
Корозія	3–16
Перевантаження	14–18
Корозійне розтріскування під напругою/корозійна втома/воднева крихкість	7–8
Знос	6–7
Високотемпературна корозія	2
Повзучість	1

З метою забезпечення працездатності вузлів тертя АТ рекомендовані різні конструктивні, експлуатаційні і технологічні методи. Що стосується технологічних методів поверхневого зміцнення деталей вузлів тертя, то необхідно відзначити наступне. На сьогодні до найбільш поширених методів поверхневого зміцнення та відновлення зношених деталей відносяться: гальванічні, поверхневого пластичного деформування, наплавлення, хіміко-термічної обробки, плазмового і детонаційного напилення, електроіскрового і лазерного легування, іонної імплантації, комбіновані та ін. Серед перерахованих способів створення зносостійких структур на робочих поверхнях взаємно контактуючих деталей вузлів тертя ЕІЛ, яке відноситься до екологічно чистих технологій, характеризується низькою енергоємністю, простотою процесу, малими габаритами обладнання у поєднанні з високою ефективністю збільшення рівня фізико-механічних властивостей і, зокрема, зносостійкості. Позитивний досвід вітчизняних вчених [13-17] та зарубіжних дослідників [18-20] свідчать про перспективність ЕІЛ як технологічного процесу при ремонті технічних засобів. Особливо це стосується деталей, які працюють в умовах абразивного зношування. В широкому навантажувально-швидкісному діапазоні в режимі тертя ковзання в умовах реалізації сухого режиму мащення застосування тугоплавких сполук та композиційних матеріалів на їх основі є найбільш ефективним при експлуатації в абразивному середовищі.

Найбільш розповсюдженими матеріалами даного класу є тверді сплави систем WC–Co, WC–TiC–Co, TiC–Ni–Mo, Cr3C2–Ni, TiCN–Ni, які застосовуються при модифікуванні поверхні конструкційних матеріалів для підвищення їх зносостійкості. В роботі [21] зазначається, що матеріали на основі карбіду вольфраму (WC) характеризуються високою міцністю і зносостійкістю, але мають велику щільність ($\rho \approx 15$ г/см^2), що робить їх достатньо дорогими. Матеріали на основі тугоплавких сполук титану і хрому мають кращу жаростійкість, твердість, невелику щільність ($\rho \approx 4 – 7$ г/см^2), але поступаються по міцності. Це пов’язано як з нижчими значеннями міцності вихідних сполук TiC, Cr3C2, TiB2 у порівнянні з WC, так і неоптимальним вибором складу металевої зв’язки.

Вивчення загальних закономірностей і мікромеханічних властивостей сформованого шару при ЕІЛ та їх вплив на механізм і кінетику зношування дозволяє визначити шляхи для управління експлуатаційними властивостями модифікованих поверхонь і удосконалювати технологію формування електроіскрових зносостійких покриттів.

Мета роботи полягала в визначенні зносостійкості покриттів, отриманих методом електроіскрового легування, в абразивному середовищі.

Експериментальне обладнання та методика дослідження. Електроіскрове легування зразків розміром 30×30 мм із конструкційної середньолегованої сталі Ст 45 здійснювали на установці «Елітрон-22» при постійному струмі короткого замикання 1А. Перед нанесенням покриття робоча поверхня зразка шліфувалась.

Нормалізацію сталі здійснювали за режимом: нагрівання до температури 950°С з наступним охолодженням в повітрі для отримання феритно-перлитної структури твердістю 95 HRB.

Електроди виготовляли із високовуглецевої сталі У12, швидкоріжучої сталі Р18, твердих сплавів ВК8 і Т15К6.

Випробування покриттів проводили на експериментальній установці (рис.1) відповідно до ГОСТ 23.208-79 (Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы). Даний стандарт втратив чинність, нового нормативного документу не розроблено. Однак, методика проведення досліджень, яка використана в роботі, аналогічна методиці в стандарті ASTM G65 Abrasive Wear Test [22].

Процес абразивного зношування моделювався у вільному не жорстко закріпленому абразиві. В якості абразиву використовували кварцевий пісок (SiO_2) зернистістю 250-500 мкм. Перед випробуванням абразивні частинки просушували у електричній печі СШОЛ (вологість не перевищувала 0,16%). До і після випробування зразки із нормалізованої сталі СТ 45 промивали в етиловому спирті і просушували. Експерименти проводили при постійній швидкості обертання гумового ролика 0,158 м/с, навантажені 44,1 Н впродовж 60 хв.

Лінійний знос покриттів визначали на приладі ІКВ-6 (вертикальний оптиметр). Діапазон проходу ±100мкм, похибка ±1мкм.

Вимірювання проводили вздовж доріжки тертя з кроком 3мм. Всього по доріжці виконували 6 вимірів, попередній досвід вимірювання показав, що параметри зносу і середнє квадратичне відхилення (СКВ) при збільшені кількості вимірювань суттєво не змінюються.

Середнє значення величини лінійного зносу покриття обчислювали за формулою:

$$\overline{X} = \frac{\Sigma x_i}{n} \tag{1}$$

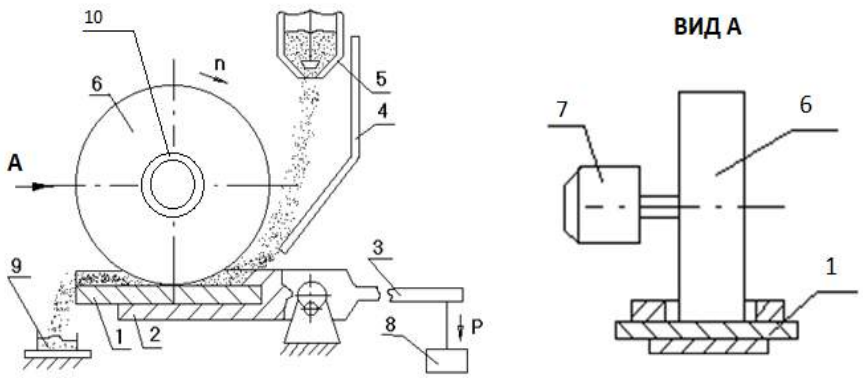
а СКВ (ς) – за формулою:

$$\varsigma = \sqrt{\frac{\Sigma(\bar{x} - x_i)^2}{n}} \tag{2}$$

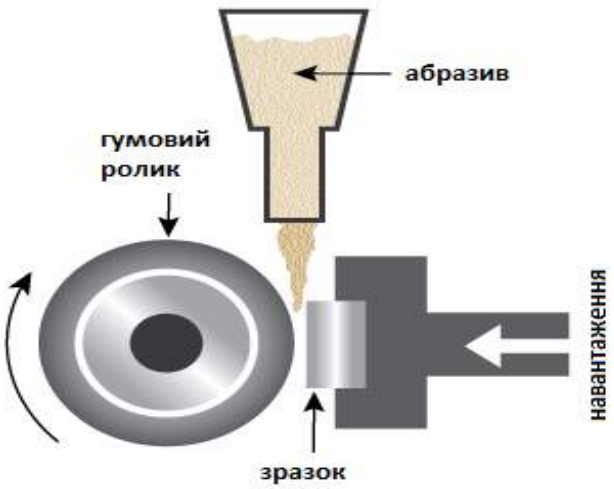
Величина ς характеризувала розкид результатів вимірювань відносно $\overline{x}$.

Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі ММР-2Р і растровому електронному мікроскопі – мікроаналізаторі РЕММА – 101А.

Твердість визначали на твердомірі Роквелла, а мікротвердість – на ПМТ-3.



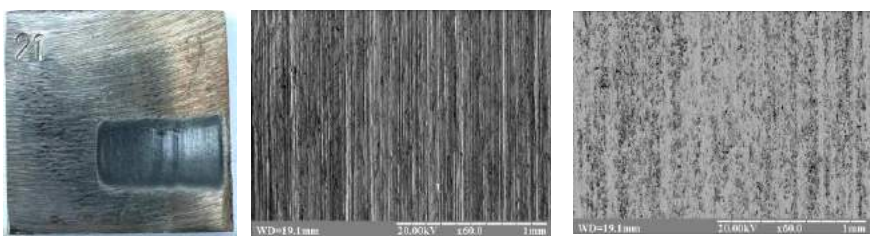
а



б

Рис. 1. Схема установки тертя для випробування на абразивну стійкість за ГОСТ 23.208-79 (*а*) та Abrasive Wear Test ASTM G65: *1* – зразок, *2* – утримувач, *3* – важіль, *4* – направляючий лоток для абразиву, *5* – дозуючий пристрій подачі абразивних часток, *6* – гумовий ролик, *7* – привід обертання, *8* – навантажувальний пристрій, *9* – бункер для відходів абразиву, *10* – вал

Результати досліджень та їх аналіз. У процесі взаємодії твердих абразивних частинок з матеріалом покриття на його робочі поверхні формується видима зона контакту, яка має вигляд лунки (рис. 2).



а *б* *в*

Рис. 2. Зовнішній вигляд зразка (*а*) і топографія зони контакту після абразивного зношування Ст 45 без покриття (*б*) і з електроіскровим покриттям (*в*)

Глибина лунки характеризує величину зносу досліджуваних покриттів. Як видно з таблиці 2, покриття, отримані електроіскровим легуванням, значною мірою підвищують зносостійкість конструкційної сталі 45, яка широко використовується у вузлах тертя машин та механізмів, зокрема, у технічних засобах наземної авіаційної техніки (тягачі, компресори, паливозаправники та ін.).

Таблиця 2

Склад та властивості сталі і електродних матеріалів

Матеріал електроду	Хімічний склад	Твердість	Відносна зносостійкість
Ст 45	0,44%C; 0,2%P; 0,1%S	95 HRB	1
У10	1,1%C; 0,3%P; 0,2%S	62 HRA	1,96
Р18	0,77%C; 4,2%Cr; 18,3%W; 1,2%V; 0,7%Mo	69 HRA	2,3
ВК8	92%WC; 8%Co	87 HRA	2,9
Т15К6	79%WC; 15%TiC; 6%Co	90 HRA	3

Відомо [23], що на інтенсивність абразивного зношування суттєвий вплив здійснюють багато факторів, а саме: властивості матеріалів, вид їх взаємодії, геометрія твердих частинок, агресивність середовища та ін. Особливу роль відіграє твердість контактуючих матеріалів (твердих абразивних частинок і зношуваного матеріалу), що підтверджено представленими в табл. 2 результатами досліджень.

Найбільше руйнування, а відповідно і зношування, виявлено у сталі марки У10 без покриття. При взаємодії твердих абразивних частинок з робочою поверхнею сталевого зразка у місцях контакту відбувається занурення їх у поверхневий шар матеріалу з подальшим руйнуванням у процесі його мікрорізання одиничними зернами кварцевого піску, про що свідчать сліди на поверхні сталі, які мають форму борозни (рис. 2, *б*). Незначна поверхнева міцність сталі У10 та невелика її твердість спричинюють домінування процесів пластичного деформування внаслідок низькому опору, що призводить до інтенсифікації абразивного зношування, в порівнянні з іншими досліджуваними зразками.

Аналіз отриманих результатів показав, що модифікація сталі Ст 45 електроіскровими покриттями, отриманими при використанні у якості електродного матеріалу Р18, ВК8 і Т15К6, суттєво знижують знос сталі. На поверхні тертя кількість і глибина борозн зменшується (рис. 2, *в*), інтенсивність зношування уповільнюється.

Це можна пояснити особливостями структури електроіскрових покриттів, а саме, розташуванням у пластичній кобальтовій матриці армованих високотвердих частинок карбідів (WC, TiC), які сповільнюють рух дислокацій, а відповідно уповільнюється процес руйнування покриття. Враховуючи, що твердість абразивних часток близька до твердості випробовуваних матеріалів, то необхідно провести подальші дослідження стосовно протікання пластичної деформації в приповерхневих шарах модифікованих електроіскровими покриттями поверхонь та імовірності утворення приповерхневих тріщин внаслідок зростання крихкості сформованих покриттів з високою твердістю.

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що ЕІЛ суттєво підвищує зносостійкість конструкційної сталі Ст 45 при використанні електродів, виготовлених із високовуглецевої сталі і твердих сплавів.

Список літератури

1. Соловйов В. І., Коротін С. М., Коровін І. П. Організація експлуатації бойової авіаційної техніки. Підручник: К., НУОУ, 2016, 216 с.

2. Ігнатович С. Р., Маленко В. Н., Лабунец В.Ф. Идентификация поверхностной прочности деталей узлов трения летательных аппаратов. Проблемы трибологии. 2007. №1. С. 11-14.

3. Беззубець С. В., Сорочан О. О. Аналіз стану та перспекстив розвитку системи технічного обслуговування авіації повітряних сил збройних сил України. Збірник наукових праць кафедри авіації. Інженерно-авіаційне забезпечення. 2021. № 2(9). С. II-1-10.

4. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении. К.: Техніка, 1976. 246с.

5. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Педан Є. В., Березівський Н. М. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. Проблеми тертя та зношування. 2023. 2 (99). С.4-13.

6. Ilina O.A., Mikosianchyk O.O., Yashchuk O. P. et al. Tribomonitoring of the quality of aviation hydraulic oils according to lubricity and rheological indicators. Problems of Tribology. 2023. V. 28, No 1/107. P.34-40.

7. Arne F., Plante B., Samuels A., Savourey A. Take Care of Your Brakes. URL: https://safetyfirst.airbus.com/take-care-of-your-brakes/ (дата звернення: 14.09.2023).

8. Awang M., Khalili A.A., Pedapati S.R. A Review: Thin Protective Coating for Wear Protection in High-Temperature Application. Metals. 2020. 10. 42

9. Criou O. A350 XWB family & technologies. Presentation at Hamburg University of Applied Sciences. 2007. URL: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2007_09_20_A350XWB.pdf (дата звернення: 14.09.2023).

10. Faisal N., Cora Ö. N., Bekci M. L. et al. Defect Types. In: Sause M.G.R., Jasiūnienė E. (eds) Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace. Springer Aerospace Technology. Springer, Cham. 2021. P.15-73.

11. Kutyinov V. F, Ionov A. A Ch. 1 specific features of composite-material structural design. In: Zagainov GI, Lozinolozinsky GE (eds) Composite materials in aerospace design. Chapman and Hall, 1996. ISBN 0412584700. P. 1–117.

12. Gautier G., Faga M. G., Tebaldo, V. Impact Wear Resistance of Nanocomposite Coatings for Aircraft Components. Key Engineering Materials. 2019. Vol. 813. P. 387-392.

13. Konoval V.P., Umanskii O.P., Panasyuk A.D., Lukyanchuk O.F. Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the properties of electrospark-deposited coatings. I. Mass transfer rate and coating composition. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2014. Vol.53. No.1–2. P.31–39.

14. Верхотуров А. Д., Муха И. М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей -К.: Техніка, 1982. 181с.

15. Подчерняева И. А., Юречко Д. В., Панасюк А. Д., Тепленко М. А. Закономерности массопереноса и адгезионное взаимодействие при электроискровом легировании (ЭИЛ) сплава АЛ9 керамическими электродами AlN-Ti(Zr)B_2-Ti(Zr)Si_2. Порошковая металлургия. 2004. N9/10. 43-50с.

16. Konoval V.P., Umanskii O.P., Kostenko O.D., Martsenyuk I.S. Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the properties of electrospark-deposited coatings. II. Coating hardness and wear resistance. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2014. Vol.53. No.3–4. P.210–218.

17. Стороженко М. С., Уманський О. П. Зносостійкість електроіскрових покриттів з композиційних матеріалів (TiB2-SiC)-(Ni-Cr). Problems of Friction and Wear. 2009. С.149-156.

18. Kandevaa M., Kostadinovb G., Penyashkib T. et al. Abrasive Wear Resistance of Electrospark Coatings on Titanium Alloys. Tribology in Industry. 2022. Vol. 44, No. 1. P. 132-142.

19. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. Lubricants. 2014. Vol.2. P.66–89.

20. Niu J., Zhang L.-W., Zhang Q.-Z. et al. Microstructure of TiC Coating Deposited by Electric-spark Process on BT20 Titanium Alloy. Heat Treatment of Metals. 2006. Vol. 31, no. 4. P. 59-61.

21. Коновал В.П. Стійкість до абразивного зношування композиційних матеріалів та покриттів на основі дибориду титану-хрому. Проблеми трибології (Problems of Tribology). 2015. № 1. С.25-30.

22. Abrasive Wear Test ASTM G65. URL: https://extremecoatings.net/technical-resources/test-results/abrasive-wear-test-astm-g65 / (дата звернення: 14.09.2023).

23. Borak K. Impact of the form factor of the abrasive particles of the soil on the intensity of the tilling machines tools wear. Scientific Works of VNTU. 2020. № 1.

Стаття надійшла до редакції 16.09.2023.

Скворцов Олександр Олексійович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 095 736 07 25, E-mail: pomorie@i.ua, https://orcid.org/0009-0008-8778-6400.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-2438-1333.

O. O. SKVORTSOV, O. O. MIKOSIANCHYK

RESEARCH OF THE WEAR RESISTANCE OF ELECTRO-SPARK COATINGS UNDER ABRASIVE CONDITIONS

The reasons for the destruction of parts of the friction units of aircraft and ground aviation equipment, which are made of iron-based alloys, were analyzed, and it was established that during operation, various processes develop on their working surfaces, namely: abrasive wear, seizure, fretting - corrosion, fatigue wear. The analysis of modern technological methods of surface strengthening of machine parts was carried out, the prospects of electrospark alloying of iron-based alloys were determined. Research on the wear resistance of coatings was carried out using a complex methodology, which includes metallographic, electron microscopic, durometric, and other methods of analysis of physical and mechanical methods. The influence of electrode materials on the wear resistance of ESD coatings has been established. Practical recommendations for surface strengthening of parts of automatic transmission systems operating under conditions of abrasive wear are indicated.

***Keywords*:** efficiency; coating; wear; abrasive; durability.

References

1. Solovjov V. I., Korotin S. M., Korovin I. P. Organizacija ekspluataciї bojovoї aviacijnoї tehniki. Pidruchnik: K., NUOU, 2016, 216 s.

2. Ignatovich S. R., Malenko V. N., Labunec V.F. Identifikacija poverhnostnoj prochnosti detalej uzlov trenija letatel'nyh apparatov. Problemy tribologii. 2007. №1. C. 11-14.

3. Bezzubec' S. V., Sorochan O. O. Analiz stanu ta perspekstiv rozvitku sistemi tehnichnogo obslugovuvannja aviaciї povitrjanih sil zbrojnih sil Ukraïni. Zbirnik naukovih prac' kafedri aviaciї. Inzhenerno-aviacijne zabezpechennja. 2021. № 2(9). S. II-1-10.

4. Kosteckij B. I. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii. K.: Tehnika, 1976. 246s.

5. Mikosjanchik O. O., Jakobchuk O. Є., Pedan Є. V., Berezivs'kij N. M. Vpliv stupenja okislennja na protiznoshuval'ni vlastivosti aviacijnih oliv. Problemi tertja ta znoshuvannja. 2023. 2 (99). S.4-13.6. Ilina O.A., Mikosianchyk O.O., Yashchuk O. P. et al. Tribomonitoring of the quality of aviation hydraulic oils according to lubricity and rheological indicators. Problems of Tribology. 2023. V. 28, No 1/107. P.34-40.

7. Arne F., Plante B., Samuels A., Savourey A. Take Care of Your Brakes. URL: https://safetyfirst.airbus.com/take-care-of-your-brakes/ (дата звернення: 14.09.2023).

8. Awang M., Khalili A.A., Pedapati S.R. A Review: Thin Protective Coating for Wear Protection in High-Temperature Application. Metals. 2020. 10. 42

9. Criou O. A350 XWB family & technologies. Presentation at Hamburg University of Applied Sciences. 2007. URL: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2007_09_20_A350XWB.pdf (дата звернення: 14.09.2023).

10. Faisal N., Cora Ö. N., Bekci M. L. et al. Defect Types. In: Sause M.G.R., Jasiūnienė E. (eds) Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace. Springer Aerospace Technology. Springer, Cham. 2021. P.15-73.

11. Kutyinov V. F, Ionov A. A Ch. 1 specific features of composite-material structural design. In: Zagainov GI, Lozinolozinsky GE (eds) Composite materials in aerospace design. Chapman and Hall, 1996. ISBN 0412584700. P. 1–117.

12. Gautier G., Faga M. G., Tebaldo, V. Impact Wear Resistance of Nanocomposite Coatings for Aircraft Components. Key Engineering Materials. 2019. Vol. 813. P. 387-392.

13. Konoval V.P., Umanskii O.P., Panasyuk A.D., Lukyanchuk O.F. Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the properties of electrospark-deposited coatings. I. Mass transfer rate and coating composition. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2014. Vol.53. No.1–2. P.31–39.

14. Verhoturov A. D., Muha I. M. Tehnologija jelektroiskrovogo legirovanija metallicheskih poverhnostej -K.: Tehnika, 1982. 181s.

15. Podchernjaeva I. A., Jurechko D. V., Panasjuk A. D., Teplenko M. A. Zakonomernosti massoperenosa i adgezionnoe vzaimodejstvie pri jelektroiskrovom legirovanii (JeIL) splava AL9 keramicheskimi jelektrodami AlN-Ti(Zr)B2-Ti(Zr)Si2. Poroshkovaja metallurgija. 2004. N9/10. 43-50 s.

16. Konoval V.P., Umanskii O.P., Kostenko O.D., Martsenyuk I.S. Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the properties of electrospark-deposited coatings. II. Coating hardness and wear resistance. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2014. Vol.53. No.3–4. P.210–218.

17. Storozhenko M. S., Umans'kij O. P. Znosostijkist' elektroiskrovih pokrittiv z kompozicijnih materialiv (TiB2-SiC)-(Ni-Cr). Problems of Friction and Wear. 2009. S.149-156.

18. Kandevaa M., Kostadinovb G., Penyashkib T. et al. Abrasive Wear Resistance of Electrospark Coatings on Titanium Alloys. Tribology in Industry. 2022. Vol. 44, No. 1. P. 132-142.

19. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. Lubricants. 2014. Vol.2. P.66–89.

20. Niu J., Zhang L.-W., Zhang Q.-Z. et al. Microstructure of TiC Coating Deposited by Electric-spark Process on BT20 Titanium Alloy. Heat Treatment of Metals. 2006. Vol. 31, no. 4. P. 59-61.

21. Konoval V.P. Stijkist' do abrazivnogo znoshuvannja kompozicijnih materialiv ta pokrittiv na osnovi diboridu titanu-hromu. Problemi tribologiї (Problems of Tribology). 2015. № 1. S.25-30.

22. Abrasive Wear Test ASTM G65. URL: https://extremecoatings.net/technical-resources/test-results/abrasive-wear-test-astm-g65/ (дата звернення: 14.09.2023).

23. Borak K. Impact of the form factor of the abrasive particles of the soil on the intensity of the tilling machines tools wear. Scientific Works of VNTU. 2020. № 1.

Skvortsov Oleksandr Oleksiyovych – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: pomorie@i.ua, https://orcid.org/0009-0008-8778-6400.

Mikosianchyk Oksana Oleksandrivna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-2438-1333.