

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАРАКУРКЧИ ГАННА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.35

ДИСЕРТАЦІЯ
НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ПЛАЗМО-ЕЛЕКТРОЛІТНОГО
ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРООКСИДНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ
ЕКОТЕХНОЛОГІЙ

05.17.03 – технічна електрохімія
(16 – хімічна та біоінженерія)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ганна КАРАКУРКЧИ

Науковий консультант –
САХНЕНКО Микола Дмитрович,
доктор технічних наук, професор

Харків 2020

АНОТАЦІЯ

Каракуркчі Г.В. Науково-технологічні засади плазмо-електролітного формування гетерооксидних покриттів для екотехнологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.03 – технічна електрохімія (161 – хімічні технології та інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2020.

Об'єкт дослідження – електрохімічні та хімічні процеси на міжфазовій межі та в оксидному шарі при формуванні гетерооксидних покриттів на сплавах алюмінію і титану.

Предмет дослідження – механізм процесу поверхневої обробки сплавів алюмінію та титану у лужних розчинах електролітів, технологічні параметри плазмо-електролітного оксидування, склад, структура та функціональні властивості гетерооксидних покриттів.

Дисертацію присвячено розробці наукових засад технології плазмо-електролітного формування гетерооксидних покриттів заданого складу і функціональних властивостей на сплавах алюмінію (титану) для екотехнологій. Висунуто та експериментально доведено гіпотези щодо гомогенізації поверхні багатокомпонентних сплавів алюмінію (титану) та формування заданого рельєфу оксидної матриці плазмо-електролітним оксидуванням у лужних розчинах дифосфатів та формування міцноадгезованих гетерооксидних покриттів із широким спектром функціональних властивостей на сплавах алюмінію (титану), що реалізається в одному технологічному процесі плазмо-електролітним оксидуванням у лужних розчинах дифосфатів за присутності сполук металів-допантів.

За результатами комплексного дослідження плазмо-електролітного оксидування багатокомпонентних сплавів запропоновано нову парадигму інженерії поверхні, за якою в одному технологічному процесі проводять

гомогенізацію поверхні оброблюваних матеріалів із мінімізацією вмісту їх легувальних елементів, утворення наперед заданої топографії монооксидної матриці Al_2O_3 (TiO_2) та одночасною інкорпорацією цільових допувальних компонентів.

Запропоновано використання комплексних електролітів на основі дифосфатів лужних металів для прискорення електрохімічного розчинення, зв'язування та видалення легувальних елементів із поверхневих шарів багатокомпонентних сплавів алюмінію (титану), встановлено шляхи керування гомогенізацією поверхні та доведено, що ПЕО в розчині $0,5\text{--}1,0$ моль/дм³ $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ за густини струму $5\text{--}7$ А/дм² дозволяє зменшити вміст легувальних елементів у поверхневих шарах в $4\text{--}5$ разів та сформувати розвинену оксидну матрицю металу-носія, що склало підґрунтя для розробки узагальненої технологічної схеми процесу.

Запропоновано стратегію синтезу гетерооксидних покриттів плазмо-електролітним оксидуванням легуваних сплавів алюмінію (титану) з формуванням в одному процесі оксидної матриці металу-носія та інкорпорації оксидів металів-допантів; доведено, що співвідношення компонентів електроліту впливає на вміст допанта, морфологію та топографію поверхні гетерооксидного покриття.

З використанням диференціальних залежностей $dU/dt-U$ для опису кінетичних закономірностей та встановлення стадійності процесу плазмо-електролітного оксидування сплавів різного хімічного складу доведено, що відмінність кута нахилу таких залежностей на початкових ділянках ПЕО зумовлена формуванням оксидів різної природи, а домінанта реакцій розчинення компонентів сплаву над реакціями формування оксидів з високим питомим опором обумовлює появу плато на залежності $dU/dt-U$, протяжність якого відбиває формування гетерооксидного шару.

Обґрунтовано концепцію інкорпорації оксидів Mn та Co до складу покриттів і доведено, що в лужних електролітах на основі дифосфатів при додаванні солей металів-допантів в режимі «спадаючої потужності»

з варіюванням густини струму формуються гетерооксидні покриття $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_x$ із вмістом мангану до 36,0 ат.% та $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_y$ із вмістом кобальту до 24,0 ат.%, що дозволило визначити оптимальні умови синтезу.

Підтверджено утворення в запропонованих режимах матриці металу-носія із фазовою структурою корунду, в яку інкорпоровані оксиди металів-допантив змінної валентності. Встановлено, що значне зростання мікротвердості для системи $\text{Al} | \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_y$ зумовлено не тільки утворенням $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в каналах пробою, а і формуванням структури сапфіру CoAl_2O_4 за рахунок хімічного заміщення і доведено, що термообробка гетерооксидних покриттів при температурах 300–500°C зумовлює зміну співвідношення оксидних форм допувальних компонентів при збереженні високих показників мікротвердості.

Встановлено, що одностадійна плазмо-електролітна обробка поршня двигуна КамАЗ-740 у розчинах дифосфату з додаванням манганатів (VII) та солей кобальту (II) дозволяє сформувати рівномірні міцноадгезовані каталітичні і теплозахисні гетерооксидні покриття оксидами мангану та кобальту, високу активність яких доведено в робочому процесі каталітичного горіння палива.

Знайшли подальший розвиток уявлення про систему чинників впливу на склад, морфологію, топографію та структуру гетерооксидних покриттів на легованих сплавах алюмінію (титану) і залежність функціональних властивостей оксидних шарів від режиму формування та складу поверхні.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці варіативних технологічних схем плазмо-електролітної обробки багатокомпонентних сплавів алюмінію (титану) у розчинах дифосфатів із мінімізацією вмісту легувальних елементів у поверхневих шарах та формуванням гетерооксидних покриттів з підвищеним вмістом активних компонентів й заданими функціональними властивостями.

Тестуванням розроблених покриттів на випробувальних стендах кафедри двигунів внутрішнього згорання НТУ «ХПІ» встановлено зменшення викидів оксидів азоту й вуглецю та підвищення паливної економічності двигунів за

рахунок внутрішньоциліндрового каталізу. Результатами випробувань гетерооксидних покриттів у Харківському науково-дослідному експертно-криміналістичному центрі МВС України встановлено їх підвищену корозійну стійкість та механічну міцність, що дозволило рекомендувати одержані матеріали для захисту від корозійного руйнування та підвищення механічної міцності капсулей-детонаторів, які використовуються для проведення вибухових робіт. Підвищені механічні властивості та висока адгезійна міцність оксидних покриттів до основного металу підтверджено випробуваннями на АТ «УКРНДІХІММАШ».

Теоретичні матеріали та практичні результати дослідження використано в освітньому процесі Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» при підготовці фахівців за спеціальністю «Теплоенергетика» та Військового інституту танкових військ НТУ «ХПІ» при підготовці курсантів за спеціальностями «Забезпечення військ (сил)» та «Озброєння та військова техніка».

Науково-технічна новизна розробок підтверджується 7-ма патентами України та патентом Республіки Казакстан, частина з яких відзначена дипломами Всеармійського конкурсу «Кращий винахід року», а саме: патент України № 116176 «Спосіб зниження токсичності газових викидів двигунів внутрішнього згоряння» (диплом I ступеня у номінації «Автомобільна техніка», 2017 рік); патент України № 117765 «Спосіб обробки поршнів двигунів внутрішнього згоряння» (диплом II ступеня у номінації «Автомобільна техніка», 2018 рік); патент України № 135696 «Поршень двигуна внутрішнього згоряння з каталітичним термостійким покриттям» (диплом «За оригінальність технічного рішення», 2019 рік).

Ключові слова: плазмо-електролітне оксидування, багатокомпонентні сплави, поверхнева гомогенізація, гетерооксидні покриття, морфологія поверхні, корозійна тривкість, мікротвердість, екотехнології.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Каракуркчі Г. В., Ведь М. В., Сахненко М. Д., Майба М. В. Гетерооксидні композиційні покриття на сплавах алюмінію для екотехнологій : монографія. Харків: ФОП Панов А.Н., 2020. 200 с.
2. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry: Monograph / editor-in-chief V S. Barsukov.* Kyiv, 2017. pp. 214–223.
3. Сахненко М. Д., Ведь М. В., Каракуркчі Г. В., Майба М. В. Інверсія структурних матриць металоксидних композитів. *Перспективні матеріали та процеси в прикладній електрохімії*: монографія / за заг. ред. В. З. Барсукова. Київ: КНУТД, 2018. С. 229–236.
4. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С., Богданова К. Б., Степанова І. І. Морфологія та структура керамікоподібних ПЕО-покривів на сплавах Al. *Перспективні матеріали та процеси в прикладній електрохімії*: монографія / за заг. ред. В. З. Барсукова. Київ: КНУТД, 2019. С. 210–225.
5. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D. Functional coatings on valve metals in surface treatment technologies. *Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions : Collective monograph.* Riga : Izdevniecība “Baltija Publishing”, 2020. pp. P. 275–299.
6. Sakhnenko N. D., Ved M. V., Karakurkchi A. V., Galak A. V. A study of synthesis and properties of manganese-containing oxide coatings on alloy VT1-0. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2016. Vol. 3. No 5(81). pp.. 37–43. doi:10.15587/1729-4061.2016.69390.
7. Yar-Mukhamedova G. Sh. Sakhnenko N. D., Ved M. V., Karakurkchi A. V. Mixed alumina and cobalt containing plasma electrolytic oxide coatings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2017. No. 213. 012020, 6 p. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012020.

8. Sakhnenko M., Karakurkchi A., Galak A., Menshov S., Matykin O. Examining the formation and properties of TiO₂ oxide coatings with metals of iron triad *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, No. 11(86). pp. 4–10. doi:10.15587/1729-4061.2017.97550.

9. Sakhnenko M., Ved M. V., Karakurkchi A. Nanoscale Oxide PEO Coatings Forming from Diphosphate Electrolytes. *Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications. NANO 2016*. 2017. Vol 195. P. 507–531. doi:10.1007/978-3-319-56422-7_38.

10. Ved M. V., Sakhnenko M. D., Karakurkchi A. V., Myrna T. Yu. Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety. *Functional Materials*. 2017. Vol. 24. No. 2. pp. 303–310. doi:10.15407/fm24.02.303.

11. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved M., Galak A., Petrukhin S. Application oxide-metall catalysts on valve metals in environmental catalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5, No. 10(89). P. 12–18. doi:10.15587/1729-4061.2017.109885.

12. Sakhnenko M., Ved M., Karakurkchi A. Morphology and Properties of Coatings Obtained by Plasma-Electrolytic Oxidation of Titanium Alloys in Pyrophosphate Electrolytes. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2017. Vol. 53. No. 6, P. 1082–1090. doi:10.1134/S207020511706020X.

13. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved M., Horokhivskiy A., Galak A. Study into formation of cobalt containing PEO-coatings on AK12M2MgN from a pyrophosphate electrolyte. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, No. 12(90). P. 19–27. doi:10.15587/1729-4061.2017.118028.

14. Parsadanov I. V., Sakhnenko N. D., Ved M. V., Rykova I. V., Khyzhniak, V. A., Karakurkchi A. V., Gorokhivskiy A. S. Increasing the efficiency of intracylinder catalysis in diesel engines. *Питання хімії та хімічної технології*. 2017. №6. С. 75–81.

15. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved M. V. Study of the influence of oxidizing parameters on the composition and morphology of Al₂O₃·CoO_x coatings on AL25 alloy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2,

No.12(92). P. 11–19. doi:10.15587/1729-4061.2018.128457.

16. Sakhnenko M. D., Ved M. V., Mayba M. V., Karakurkchi A. V., Galak A. V. Mixed Oxide Films Formed on Titanium Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54, No. 2. P. 203–209. doi:10.3103/S1068375518020102.

17. Yar-Mukhamedova G., Ved M., Karakurkchi A., Sakhnenko M., Atchibayev R. Research on the improvement of mixed titania and Co(Mn) oxide nano-composite coatings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. No. 369. 012019, 6 p. doi:10.1088/1757-899X/369/1/012019.

18. Karakurkchi A., Sakhnenko N., Ved M., Parsadanov I., Menshov S. Nanostructured oxide-metal catalysts for intra-cylinder catalysis. *Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties*. 2019. doi:10.1109/NAP.2018.8914840.

19. Sakhnenko N., Ved M., Karakurkchi A., Matykin, O., Menshov S. Mixed Titania Nano-composite Oxide Coatings with Iron Triad Metals. *Materials Today: Proceeding*. 2019. Vol. 6, part 2. P. 129–134. doi:10.1016/j.matpr.2018.10.085.

20. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved' M., Yermolenko I., Pavlenko S., Yevsieiev V., Pavlov Y., Yemanov V. Determining features of application of functional electrochemical coatings in technologies of surface treatment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Materials Science*. 2019. Vol. 3, No. 12(99). P. 29–38. doi:10.15587/1729-4061.2019.171787.

21. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Mayba M. V. Nanostructured Mixed Oxide Coatings on Silumin Incorporated by Cobalt. *Nanocomposites, Nanostructures, and Their Applications*. Springer Proceedings in Physics, 2019. Vol 221. P. 269–291. doi:10.1007/978-3-030-17759-1_19.

22. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Luhovskyi I. S., Drobakha H. A., Mayba M. V. Features of plasma electrolytic formation of manganese- and cobalt-containing composites on aluminum alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. Article ID 6381291, 13 p. doi:10.1155/2019/6381291.

23. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Tulenko M. V., Dzhenuk A. V. Analysis of technological approaches to electrochemical surface treatment of aluminum alloys. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Materials Science*. 2020. Vol. 3, No.12(105). P. 44–55. doi:10.15587/1729-4061.2020.206014.

24. Ведь М. В., Сахненко М. Д., Овчаренко О. О., Зюбанова С. І., Горохівський А. С., Каракуркчі Г. В., Славкова М. О. Корозійно-електрохімічні властивості метал-оксидних і композитних систем. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2016. Спецвипуск № 11. С. 157–162.

25. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С., Щокін В. М. Підходи щодо підвищення паливної економічності двигунів внутрішнього згорання бронетанкового озброєння та автомобільної техніки. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. № 2 (46). С. 26–31.

26. Сахненко М. Д., Ведь М. В., Каракуркчі Г. В., Галак О. В. Особливості одержання металоксидних каталітичних систем плазмово-електролітичним оксидуванням алюмінію та титану в пірофосфатних електролітах. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічні технології та екологія*. № 22(1194). 2016. С. 171–176.

27. Парсаданов І. В., Сахненко М. Д., Хижняк В. О., Каракуркчі Г. В. Підвищення екологічності дизелів шляхом внутрішньоциліндрової нейтралізації токсичних речовин відпрацьованих газів. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2016. № 2. С. 63–67.

28. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A. S. Synthesis of catalytic cobalt-containing coatings on alloy AL25 surface by plasma electrolytic oxidation. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2017. Т. 8. № 1. С. 73–79.

29. Ведь М. В., Сахненко М. Д., Каракуркчі Г. В., Горохівський А. С., Галак О. В. Використання змішаних оксидів кобальту і алюмінію для внутрішньоциліндрового каталізу. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічні технології та екологія*. № 49(1270). 2017. С. 20–26.

30. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Parsadanov I. V. Research of the peculiarities of plasma-electrolytic treatment of AK12M2MgN piston alloy with formation of ceramic-like coatings. *Технологический аудит и резервы производства*. 2018. № 1/1(39). С. 27–35.

31. Сахненко М., Каракуркчі Г., Ведь М., Ярошок Т., Руднева С., Горохівський А. Плазмово-електролітичний синтез гетерооксидних покриттів на високолегованих сплавах алюмінію. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. Спецвипуск № 12. С. 90–94.

32. Каракуркчі Г., Сахненко М., Ведь М. Вплив часових параметрів оксидування на склад та морфологію каталітичних покриттів $Al_2O_3 \cdot Co_xO_y$. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічні технології та екологія. № 39(1315). 2018. С. 97–102.

33. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Кайдалов Р. О., Шаповал О. М. Технології інженерії поверхонь деталей силових установок автомобільної та бронетанкової техніки. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. № 5(1330). 2019. С. 115–123.

34. Каракуркчі Г. В., Богданова К. Б., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Вплив тривалості ПЕО на морфологію та міцнісні характеристики покриттів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічні технології та екологія. 2019. № 2. С. 16–21.

35. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Зюбанова С. І., Степанова І. І. Корозійні та фізико-механічні властивості покриттів на сплаві AK12M2MgN, сформованих плазмово-електролітичним оксидуванням. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2019. Т. 55, № 5. С. 74–83.

36. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V. Peculiarities of cobalt containing oxide coatings formation on silumin. *Український хімічний журнал*. 2020. Т. 86, № 1. С. 12–21. doi: 10.33609/0041-6045.86.1.2020.12-21.

37. Спосіб формування каталітично активних покриттів оксидами мангану та кобальту на вентильних металах: пат. 114681 Україна: С25D 11/12, С25D 11/06, С25D 3/12, В01J 37/34; №а201603850; заявл.; 11.04.2016, опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

38. Спосіб формування каталітично активних кобальтовмісних оксидних покривів на алюмінії та його легованих сплавах: пат. 114686 Україна: МПК: C25D3/12, C25D11/06, B01J37/34; № a201605836; заявл.; 30.05.2016; опубл. 10.07.2017; Бюл. № 13.

39. Електроліт для формування каталітично активних кобальтовмісних оксидних покривів на алюмінії та його легованих сплавах: пат. 115955 Україна: МПК C25D 3/12, C25D11/02, C25D11/04, C25D11/06. № a201605066; заявл.; 06.05.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

40. Спосіб одержання каталізатору внутрішньоциліндрового каталізу в двигунах внутрішнього згоряння: пат. 116114 Україна: МПК F02B51/02, F02B77/02, C25D11/02, C25D11/04. № u201611439; заявл. 11.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

41. Спосіб зниження токсичності газових викидів двигунів внутрішнього згоряння: пат. 116176 Україна: МПК F02B51/02, F02B77/02, C25D11/02, C25D11/04. № u201611981; заявл. 25.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

42. Спосіб обробки поршнів двигунів внутрішнього згоряння: пат. 117765 Україна: МПК C25D11/04, F02F 3/10. № u201700072; заявл.; 03.01.2017, опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

43. Поршень двигуна внутрішнього згоряння з каталітичним термостійким покриттям: пат. 135696 Україна, F02F 3/00, F02F 3/10, C25D 11/04. № u201901473; заявл. 14.02.2019, опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13.

44. Method of formation of oxide nanodisperse coatings on aluminium alloys: pat. 4978 Republic of Kazakhstan, C25D 3/12, C25D 11/02, C25D 11/04, C25D 11/06. 2019/1012.2; declar. 18.11.2019, publ. 29.05.2020, Bul. № 21.

45. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С. Мікродугове оксидування деталей поршневої групи ДВЗ. *Хімічні проблеми сьогодення: зб. тез доп. Дев'ятої Української наукової конф. з між нар. участю.* (Вінниця, 29–30 березня 2016 р.). Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2016. С. 190.

46. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С. Шляхи підвищення економічності та екологічності ДВЗ автомобільної і бронетанкової техніки. *Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України. Секція 2. Наукове забезпечення процесів розроблення, удосконалення, експлуатації та ремонту зразків озброєння, військової та спеціальної техніки* : зб. тез доп. VII науково-практичної конференції (Харків, 31 березня 2016 р.). Харків : НАНГУ, 2016. С. 59–60.

47. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С. Особливості формування ПЕО-покривів нестехіометричними оксидами мангану та кобальту. *“Хімічні Каразінські читання – 2016” : тези доп. VIII Всеукраїнської наукової конф.* (Харків, 18–20 квітня 2016 р.). Харків : ХНУ, 2016. С. 164 – 165.

48. Каракуркчі Г. В., Ведь М. В., Сахненко М. Д., Горохівський А. С. Підходи щодо підвищення паливної економічності ДВЗ військової техніки. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ* : зб. тез доп. Міжнародної науково-технічної конференції. (Львів, 18–20 травня 2016 р.). Львів: НАСВ, 2016. С. 38–39.

49. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С. Формирование каталитически активных покрытий оксидами кобальта на алюмо-кремниевых сплавах. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матер. та прогр. 4-ї Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф. у 2 ч.* (Суми, 19–22 квітня 2016 р.). Суми: СумДУ, 2016. Ч. 2. С. 101–102.

50. Горохівський А. С. Каракуркчи А. В., Сахненко Н. Д., Ведь М. В., Особенности формирования оксидных каталитических покрытий на деталях поршневой группы ДВС. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доп. XXIV між нар. наук.-практ. конференції.* (Харків 18–20 травня 2016р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Ч.ІІ. С. 212.

51. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A. S. Nanostructured catalytic cobalt containing PEO-coatings on alloy AL25. *Chemistry, physics and technology of surface: Proceedings of Ukrainian conference with*

international participation and Workshop «Nanostructured biocompatible / bioactive materials» (Kyiv, 17–18 May 2016). Kyiv, 2016. С. 160.

52. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A. S. Galak A. V. Nanoscale oxide PEO-coatings forming from pyrophosphate electrolytes. *IV International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials* (NANO-2016) (Lviv, Ukraine, 24–27 August 2016). Lviv, 2016. P. 320.

53. Ved M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V. Mixed cobalt containing PEO-coatings on aluminium alloy. *Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов* : сб. трудов IV Междунар. науч. конф. (Алматы, 10–12 октября 2016 г.). Алматы, 2016. С. 40–44.

54. Каракуркчи А. В., Сахненко Н. Д., Ведь М. В. Оксидные каталитические системы в технологиях повышения топливной экономичности поршневых ДВС. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців : міжнар. наук.-практ. та наук.-метод. конф.* (Харків, 20–21 жовтня 2016 р.). Харків: ХНАДУ, 2016. С. 211.

55. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С. Внутрішньоциліндровий каталіз як підхід до екологізації ДВЗ. *Проблеми забруднення та очистки повітря: контроль, моніторинг, каталітичні, фотокаталітичні та сорбційні методи очистки* : матер. Україно-Польської конф. (м. Київ, 6–8 листопада 2016 р.). Дніпро: Середняк Т.К., 2016. С. 61–62.

56. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Нанорозмірні оксидні каталітичні системи на сплавах алюмінію. *Актуальні проблеми хімії і хімічної технології* : матер. II всеукр. наук.-практ. конф. (м. Київ, 21–23 листопада 2016 р.). К.: НУХТ, 2016. С. 134–135.

57. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Експериментальне дослідження формування оксидних покриттів на деталях поршневої групи ДВЗ. *Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України. Секція 2. Наукове забезпечення процесів розроблення, удосконалення,*

експлуатації та ремонту зразків озброєння, військової та спеціальної техніки : зб. тез доп. VIII науково-практичної конференції (Харків, 30 березня 2017 р.). Харків : НАНГУ, 2017. С. 92–93.

58. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Вплив режиму обробки силумінів на морфологію кобальтовмісних ПЕО-покривів. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали наук.-техн. конф.*, (Суми, 18–21 квітня 2017 р.). Суми : СДУ, 2017. Ч. 2. С. 110–111.

59. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С., Ярошок Т. П. Особливості формування ПЕО-покривів нестехіометричними оксидами кобальту на сплавах Al-Si. “Хімічні Каразінські читання – 2017” (ХКЧ–2017) : *тези доп. IX Всеукраїнської наукової конф.*. (Харків, 18–20 квітня 2017 р.). Харків : ХНУ, 2017. С. 16– 17.

60. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С., Особенности формирования допированных оксидами переходных металлов ПЭО-покрытий на АК12Mg2H. *Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи : матер. Всеукр. наук. конф.* (Житомир, 17–18 травня 2017 р.). Житомир: ЖДУ ім. І.Франка, 2017. С. 61–64.

61. Каракуркчі Г. В., Ведь М. В., Сахненко М. Д., Галак О. В., Меньшов С. М., Матикін О. В., Руднева С. І. Оксидні каталітичні системи на вентильних металах в екотехнологіях. “ABIA–2017” : *Матер. XIII Міжнар. наук.-техн. конф.* (Київ, 19-21 квітня 2017 р.). Київ : НАУ, 2017. С. 27.40–27.44.

62. Karakurkchi A. V. Catalytic PEO-coatings on valve metals. *Streszczenia XIV Warszawskie Seminarium Doktorantów Chemików* (Warszawa, 9 czerwca 2017). Warszawa, 2017. S. 100.

63. Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Ved' M. V., Mayba M. V. Effect of doping metals on the structure of PEO coatings on Ti. *V International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2017)* (Chernivtsi, Ukraine, 23–26 August 2017). Chernivtsi, 2017. P. 414.

64. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С. Доповані кобальтом оксидні покриття на вентильних металах. *Проблеми*

корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи: матеріали XXV Відкритої науково-технічної конф. (Львів, 27–29 жовтня 2017 р.). Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2017. С. 123–126.

65. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Застосування оксидно-металевих каталізаторів для внутрішньо-циліндрового каталізу ДВЗ. *Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України. Секція 2. Технічне забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: сучасний сучасний стан, проблеми та перспективи: зб. тез доп. науково-практичної конференції* (Харків, 29 березня 2018). Харків: НАНГУ, 2018. С. 42–43.

66. Каракуркчі Г. В., Горохівський А. С., Меньшов С. М., Матикін О.В. ПЕО-обробка поршневого силуміну АК12М2МгН у лужних електролітах. *Збірка тез доповідей XIII Всеукраїнської конф. з актуальних питань хімії* (м. Харків, 2–4 травня 2018 р.) Харків: Ексклюзив, 2018 р. С. 74.

67. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Перспективи застосування ПЕО-покривів на вентильних металах в екологічному каталізі. *Хімія, екологія та освіта : зб. наук. праць II Міжнар. наук.-практ. інт.-конф.* (Полтава, 15–16 травня 2018 р.). Полтава, 2018. С. 34–38.

68. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С. Особливості плазмово-електролітичної обробки силумінів у лужних електролітах. *Прикладні аспекти електрохімічного аналізу : зб. наук. праць VIII Українського з'їзду з електрохімії.* (Львів, 4–7 червня 2018 р.) Т. 2. С. 282–284.

69. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Mayba M. V. Nanostructured mixed oxide coatings incorporated by transition and refractory metals on silumin. *VI International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials* (NANO-2018) (Kyiv, Ukraine, 27–30 August 2018). Kyiv, 2018. P. 580.

70. Сахненко М. Д., Ведь М. В., Каракуркчі Г. В. Інверсія структурної матриці композиту – шлях до пошуку нових знань. *XX Українська конференція з неорганічної хімії за участю закордонних учених: тези доп.* (Дніпро, 17–20 вересня 2018 р.). Дніпро: ЛІРА, 2018. С. 142.

71. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Галак О. В., Меньшов С. М., Матикін О. В. Оксидно-металеві каталітичні системи на сплавах алюмінію та титану для екотехнологій. *Science and society : The 8th International conference*. (Hamilton, November 9, 2018). Hamilton, Canada, 2018. P. 504–515.

72. Каракуркчі Г. В., Кайдалов Р. О. Оксидні каталітичні системи в технологіях підвищення паливної економічності поршневих двигунів внутрішнього згорання. *Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України. Секція 2. Технічне та тилове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: сучасний сучасний стан, проблеми та перспективи: зб. тез доп. наук.-практ. конф.* (Харків, 29 березня 2018 р.). Харків : НАНГУ, 2018. С. 42–43.

73. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Електрохімічна обробка сплавів алюмінію із формуванням ПЕО-покривів, допованих перехідним металами. “Хімічні Каразінські читання – 2019” (ХКЧ–2019) : тези доп. XI Всеукраїнської наукової конф. (Харків, 22–24 квітня 2019 р.). Харків : ХНУ, 2019. С. 139.

74. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Майба М. В., Овчаренко О.О. Металоксидні системи: синтез і моделювання. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (15–17 травня 2019 р., Харків)*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 263.

75. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. ПЕО-покриви на сплавах алюмінію в технологіях екологічного каталізу. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019): Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції* (Херсон, 28–30 травня 2019 р.). Херсон : ХДМА, 2019. С. 365–366.

76. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В. Фактори впливу на морфологію та склад ПЕО-покривів на сплавах алюмінію. *Львівські хімічні читання: Збірник наукових праць XVII наукової конференції* (Львів, 2–5 червня 2019 р.). Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2019. С. М6.

77. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Bohdanova K. B., Stepanova I. I. Morphology and phase composition of nanostructured PEO-coatings on valve metals. *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019)* (Lviv, Ukraine, 27–30 August 2019). Lviv, 2019. P. 473.

78. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Богданова К. Б. Функціональні ПЕО-покриви на сплавах алюмінію для екотехнологій. *Problems of Materials Science and Surface Engineering (MSSE-2019): Conference abstracts of Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering* (25-27 вересня 2019 року, Львів). ФМІ НАН України, 2019. С. 131–134.

79. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Майба М. В. Дослідження фрактальності гетерооксидних покриттів на сплавах алюмінію. “Хімічні Каразінські читання – 2020”: тези доп. XII Всеукраїнської наук. конф. (Харків, 21–23 квітня 2020 р.). Харків : ХНУ, 2020. С. 132–133.

ABSTRACT

Karakurkchi H.V. Scientific and Technological Bases of Plasma-electrolyte Formation of Heterooxide Coatings for Ecotechnologies. – Manuscript.

Dissertation for the Degree of the Doctor of Engineering Sciences in the Specialty of 05.17.03 – technical Electrochemistry (161 – Chemical Technology and Engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2020.

The object of research is chemical and electrochemical processes in the volume of electrolyte, oxide coating and interface in the formation of heterooxide coatings on aluminum and titanium alloys.

The subject of research is the mechanism of the surface treatment of aluminum and titanium alloys in alkaline solutions of electrolytes, technological parameters of plasma-electrolyte oxidation, composition, structure and functional properties of heterooxide coatings.

The thesis is devoted to the development of scientific bases of plasma-electrolytic formation of heterooxide coatings of a given composition and functional properties on aluminum (titanium) alloys for ecotechnologies. Hypotheses were generated and experimentally proved concerning the homogenization of the surface of aluminum (titanium) multicomponent alloys and the formation of a given relief of the oxide matrix by plasma-electrolyte oxidation in alkaline solutions of diphosphates and the formation of strongly adhered heterooxide coatings with a wide range of functional properties on aluminium (titanium) alloys by executing plasma-electrolytic oxidation in alkaline solutions of diphosphates with the presence of dopant metal compounds in one technological process.

As a result of a comprehensive study of plasma-electrolytic oxidation of multicomponent alloys, a new paradigm of surface engineering is proposed, according to which in one technological process the surface of processed materials is homogenized with minimization of their alloying components, formation of

predefined topography of Al_2O_3 (TiO_2) monoxide matrix and simultaneous incorporation of target alloying components.

The use of complex electrolytes based on alkali metal diphosphates for acceleration of electrochemical dissolution, binding and removal of alloying components from the surface layers of multicomponent aluminum (titanium) alloys is proposed, ways to control surface homogenization are established and it is proved that PEO 1.0 in 0.5 mol/L $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ solution at a current density of 5–7 A/dm^2 allows to reduce the content of alloying components in the surface layers by 4–5 times and to form developed oxide matrix of the metal-carrier, which became the basis for the development of a generalized flow chart.

It is proposed to use a strategy for the synthesis of heteroxide coatings by plasma-electrolyte oxidation of alloyed aluminum (titanium) alloys with the formation of the oxide matrix of the metal-carrier and the incorporation of oxides of metal-dopants in one process; it is proved that the ratio of electrolyte components affects the content of dopant, morphology and topography of the heteroxide coating surface.

With the use of differential dependences $dU/dt-U$ in order to describe the kinetic laws and establish the stages of the process of plasma-electrolytic oxidation of alloys of different chemical composition, it is proved that the difference in the slope of such dependences at the initial sites of PEO is due to the formation of oxides of different nature, and the dominant of dissolution reactions of alloys components over the reaction of oxide formation with high resistivity cause the appearance of a plateau on the $dU / dt - U$ dependence, the length of which reflects the formation of a heteroxide layer.

The conception of incorporation of Mn and Co oxides into the coatings was substantiated and it is proved that in alkaline electrolytes, which are based on diphosphates, with the addition of metal-dopant salts in the mode of "decreasing power" with variation of current density heteroxide oxide coatings $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_x$ with manganese content up to 36 % and $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_y$ with cobalt content

up to 24.0 %, are formed that allowed to determine the optimal synthesis conditions.

The formation of matrix of metal-carrier in proposed modes with a phase structure of corundum, in which oxides of dopant metals of variable valence are incorporated, is confirmed. It is established that a significant increase in microhardness for the system Al | Al₂O₃·CoO_y is caused not only by the formation of α-Al₂O₃ in breakdown paths, but also by the formation of the structure of CoAl₂O₄ sapphire due to chemical substitution and it is proved that heat treatment of heteroxide coatings at temperatures of 300–500 ° C causes a change in the ratio of oxide forms of alloying components while maintaining high microhardness values.

It is established that one-stage plasma-electrolyte treatment of the KamAZ-740 engine piston in diphosphate solutions with the addition of manganates (VII) and cobalt (II) salts allows to form uniform strongly adhered catalytic and heat-protective heteroxide coatings by oxides of manganese and cobalt, high activity of which was proved in the process of catalytic fuel combustion.

The idea of the system of factors influencing the composition, morphology, topography and structure of heteroxide coatings on alloyed aluminum (titanium) alloys and the dependence of the functional properties of oxide layers on the mode of formation and surface composition was further developed.

The practical significance of the obtained results lies in the development of variable technological schemes of plasma-electrolyte treatment of multicomponent aluminum (titanium) alloys in diphosphate solutions with minimization of alloying components in surface layers and formation of heteroxide coatings with high content of active components and given functional properties.

Testing of the developed coatings on the test benches of the Department of Internal Combustion Engines of NTU "KhPI" revealed a reduction in emissions of nitrogen and carbon oxides and increase in fuel efficiency of engines due to internal cylinder catalysis. The results of tests of heteroxide coatings in the Kharkiv Scientific Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of

Ukraine established their increased corrosion resistance and mechanical strength, which allowed to recommend the obtained materials to protect against corrosion damage and increase the mechanical strength of detonator caps used for blasting. Increased mechanical properties and high adhesive strength of oxide coatings to the base metal were confirmed by tests at JSC "UKRNDIHIMMASH".

Theoretical materials and practical results of the research were used in the educational process of the National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute" in the training of specialists in the specialty "Thermal power" and the Military Institute of Armored Forces of NTU "KhPI" in the training of cadets in the specialties "Provision of troops (forces)" and "Armament and military equipment".

The scientific and technical novelty of the developments is confirmed by 7 patents of Ukraine, some of which were awarded diplomas of the All-Army competition "Best Invention of the Year", namely: patent of Ukraine # 116176 "Method of reducing toxicity of gaseous emissions from internal combustion engines" (first-degree diploma certificate in nomination "Automotive Equipment", 2017); patent of Ukraine # 117765 "Method of processing pistons of internal combustion engines" (second-degree diploma certificate in nomination "Automotive Equipment", 2018); patent of Ukraine # 135696 "Piston of an internal combustion engine with a catalytic heat-resistant coating" (diploma certificate "For the originality of the technical solution", 2019).

Key words: plasma electrolytic oxidation, multicomponent alloys, surface homogenization, metal-dopant, heteroxide coating, functional properties, catalytic activity, ecotechnologies.

LIST OF PUBLISHED WORKS BY DISSERTATION TOPIC:

1. Karakurkchi H. V., Ved' M. V., Sakhnenko M. D., Mayba M. V. Heterooksydni kompozytsiyni pokryttya na splavakh alyuminiyu dlya ekotekhnolohiy [Heteroxide composite coatings on aluminum alloys for ecotechnologies] : monohrafiya. Kharkiv: FOP Panov A.N., 2020. 200 s.

2. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry: Monograph / editor-in-chief V S. Barsukov. Kyiv, 2017. P. 214–223.
3. Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Karakurkchi H. V., Mayba M. V. Inversiya strukturnykh matryts' metaloksydnykh kompozytiv [Inversion of structural matrices of metal oxide composites]. Perspektyvni materialy ta protsesy v prykladniy elektrokhimiyi: monohrafiya / za zah. red. V. Z. Barsukova. Kyiv: KNUTD, 2018. C. 229–236.
4. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyy A. S., Bohdanova K. B., Stepanova I. I. Morfolohiya ta struktura keramikopodobnykh PEO-pokryviv na splavakh Al [Morphology and structure of ceramic-like PEO coatings on Al alloys]. Perspektyvni materialy ta protsesy v prykladniy elektrokhimiyi: monohrafiya / za zah. red. V. Z. Barsukova. Kyiv: KNUTD, 2019. C. 210–225.
5. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D. Functional coatings on valve metals in surface treatment technologies. Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions : Collective monograph. Riga : Izdevniecība “Baltija Publishing”, 2020. P. 275–299.
6. Sakhnenko N. D., Ved M. V., Karakurkchi A. V., Galak O. V. A study of synthesis and properties of manganese-containing oxide coatings on alloy VT1-0. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 3. No 5(81). P. 37–43. doi:10.15587/1729-4061.2016.69390.
7. Yar-Mukhamedova G. Sh., Sakhnenko N. D., Ved M. V., Karakurkchi A. V. Mixed alumina and cobalt containing plasma electrolytic oxide coatings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. 213. 012020, 6 p. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012020.
8. Sakhnenko M., Karakurkchi A., Galak A., Menshov S., Matykin O. Examining the formation and properties of TiO₂ oxide coatings with metals of iron

triad Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2, No. 11(86). pp. 4–10. doi:10.15587/1729-4061.2017.97550.

9. Sakhnenko M., Ved M. , Karakurkchi A. Nanoscale Oxide PEO Coatings Forming from Diphosphate Electrolytes. Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications. NANO 2016. 2017. Vol 195. P. 507–531. doi:10.1007/978-3-319-56422-7_38.

10. Ved M. V., Sakhnenko M. D., Karakurkchi A. V., Myrna T. Yu. Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety. Functional Materials. 2017. Vol. 24. No. 2. pp. 303–310. doi:10.15407/fm24.02.303.

11. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved M., Galak A., Petrukhin S. Application oxide-metall catalysts on valve metals in environmental catalysis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, No. 10(89). P. 12–18. doi:10.15587/1729-4061.2017.109885.

12. Sakhnenko M., Ved M. V., Karakurkchi A. Morphology and Properties of Coatings Obtained by Plasma-Electrolytic Oxidation of Titanium Alloys in Pyrophosphate Electrolytes. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2017. Vol. 53. No. 6, P. 1082–1090. doi:10.1134/S207020511706020X.

13. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved M. V., Horokhivskiy A., Galak A. Study into formation of cobalt containing PEO-coatings on AK12M2MgN from a pyrophosphate electrolyte. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, No. 12(90). P. 19–27. doi:10.15587/1729-4061.2017.118028.

14. Parsadanov I. V., Sakhnenko N. D., Ved M. V., Rykova I. V., Khyzhniak V. A., Karakurkchi A.V., Gorokhivskiy A. S. Increasing the efficiency of intracylinder catalysis in diesel engines. Voprosy himii i himicheskoy tehnologii. 2017. №6. S. 75–81.

15. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved M. V. Study of the influence of oxidizing parameters on the composition and morphology of $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CoO}_x$ coatings on AL25 alloy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, No.12(92). P. 11–19. doi:10.15587/1729-4061.2018.128457.

16. Sakhnenko M. D., Ved M. V., Mayba M. V., Karakurkchi A. V., Galak A. V. Mixed Oxide Films Formed on Titanium Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54, No. 2. P. 203–209. doi:10.3103/S1068375518020102.

17. Yar-Mukhamedova G. Sh., Ved M. V., Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Atchibayev R. Research on the improvement of mixed titania and Co(Mn) oxide nano-composite coatings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. No. 369. 012019, 6 p. doi:10.1088/1757-899X/369/1/012019.

18. Karakurkchi A., Sakhnenko N., Ved M., Parsadanov I., Menshov S. Nanostructured oxide-metal catalysts for intra-cylinder catalysis. *Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties*. 2019. doi:10.1109/NAP.2018.8914840.

19. Sakhnenko N., Ved M., Karakurkchi A., Matykin, O., Menshov S. Mixed Titania Nano-composite Oxide Coatings with Iron Triad Metals. *Materials Today: Proceeding*. 2019. Vol. 6, part 2. P. 129–134. doi:10.1016/j.matpr.2018.10.085.

20. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved' M., Yermolenko I., Pavlenko S., Yevsieiev V., Pavlov Y., Yemanov V. Determining features of application of functional electrochemical coatings in technologies of surface treatment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Materials Science*. 2019. Vol. 3, No. 12(99). P. 29–38. doi:10.15587/1729-4061.2019.171787.

21. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Mayba M. V. Nanostructured Mixed Oxide Coatings on Silumin Incorporated by Cobalt. *Nanocomposites, Nanostructures, and Their Applications. Springer Proceedings in Physics*, 2019. Vol 221. P. 269–291. doi:10.1007/978-3-030-17759-1_19.

22. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Luhovskyi I. S., Drobakha H. A., Mayba M. V. Features of plasma electrolytic formation of manganese- and cobalt-containing composites on aluminum alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. Article ID 6381291, 13 p. doi:10.1155/2019/6381291.

23. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Tulenko M. V., Dzheniuk A. V. Analysis of technological approaches to electrochemical surface treatment of aluminum alloys. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Materials Science*. 2020. Vol. 3, No.12(105). P. 44–55. doi:10.15587/1729-4061.2020.206014.

24. Ved' M. V., Sakhnenko M. D., Ovcharenko O. O., Zyubanova S. I., Horokhivs'kyi A. S., Karakurkchi H. V., Slavkova M. O. Koroziyno-elektrokhimichni vlastyvoli metal-oksydnykh i kompozytnykh system [Corrosion and electrochemical properties of metal oxide and composite systems]. *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv*. 2016. Spetsvypusk № 11. S. 157–162.

25. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyi A. S., Shchokin V. M. Pidkhydy shchodo pidvyshchennya palyvnoyi ekonomichnosti dvyhunyv vnutrishn'oho z'horyannya bronetankovoho ozbroyennya ta avtomobil'noyi tekhniky [Approaches to increase the fuel efficiency of internal combustion engines of armored weapons and automotive equipment]. *Systemy ozbroyennya i viys'kova tekhnika*. 2016. № 2 (46). S. 26–31.

26. Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Karakurkchi H. V., Halak O. V. Osoblyvosti oderzhannya metaloksydnykh katalitychnykh system plazmovo-elektrolitychnym oksyduvannyam alyuminiyu ta tytanu v pirofosfatnykh elektrolitakh [Peculiarities of obtaining metal oxide catalytic systems by plasma-electrolytic oxidation of aluminum and titanium in pyrophosphate electrolytes]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Khimiya, khimichni tekhnolohiyi ta ekolohiya*. № 22(1194). 2016. S. 171–176.

27. Parsadanov I. V., Sakhnenko M. D., Khyzhnyak V. O., Karakurkchi H. V. Pidvyshchennya ekolohichnosti dyzeliv shlyakhom vnutrishn'otsylindrovoyi neytralizatsiyi toksychnykh rehovyn vidprats'ovanykh haziv [Improving the environmental friendliness of diesels by in-cylinder neutralization of toxic exhaust gases]. *Dvyhately vnutrenneho s'horannya*. 2016. № 2. S. 63–67.

28. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A. S. Synthesis of catalytic cobalt-containing coatings on alloy AL25 surface by plasma

electrolytic oxidation. *Ximiya, fizy`ka ta texnologiya poverxni*. 2017. T. 8. № 1. S. 73–79.

29. Ved' M. V., Sakhnenko M. D., Karakurkchi H. V., Horokhivs'kyi A. S., Halak O. V. Vykorystannya zmishanykh oksydiv kobal'tu i alyuminiyu dlya vnutrishn'otsylindrovoho katalizu [Use of mixed oxides of cobalt and aluminum for intra-cylinder catalysis]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Khimiya, khimichni tekhnolohiyi ta ekolohiya. № 49(1270). 2017. S. 20–26.

30. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Parsadanov I. V. Research of the peculiarities of plasma-electrolytic treatment of AK12M2MgN piston alloy with formation of ceramic-like coatings. *Technological audit and production reserves*. 2018. № 1/1(39). C. 27–35.

31. Sakhnenko M., Karakurkchi H., Ved' M., Yaroshok T., Rudnyeva S., Horokhivs'kyi A. Plazmovo-elektrolitychnyy syntez heterooksydnykh pokryviv na vysokolehovanykh splavakh alyuminiyu [Plasma-electrolytic synthesis of heteroxide coatings on high-alloy aluminum alloys]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. 2018. Spetsvypusk № 12. S. 90–94.

32. Karakurkchi H., Sakhnenko M., Ved' M. Vplyv chasovykh parametriv oksyduvannya na sklad ta morfolohiyu katalitychnykh pokryviv $Al_2O_3 \cdot Co_xO_y$ [Influence of oxidation time parameters on the composition and morphology of catalytic coatings $Al_2O_3 \cdot Co_xO_y$]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Khimiya, khimichni tekhnolohiyi ta ekolohiya. № 39(1315). 2018. S. 97–102.

33. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Kaydalov R. O., Shapoval O. M. Tekhnolohiyi inzheneriyi poverkhon' detaley sylovykh ustanovok avtomobil'noyi ta bronetankovoyi tekhniky [Technologies of surface engineering of details of power plants of automobile and armored vehicles]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. № 5(1330). 2019. S. 115–123.

34. Karakurkchi H. V., Bohdanova K. B., Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Vplyv tryvalosti PEO na morfolohiyu ta mitsnisni kharakterystyky pokryttiv [Influence of PEO duration on morphology and strength characteristics of

coatings]. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Khimiya, khimichni tekhnolohiyi ta ekolohiya. № 2. 2019. S. 16–21.

35. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Zyubanova S. I., Stepanova I. I. Koroziyni ta fizyko-mekhanichni vlastyivosti pokryviv na splavi AK12M2MhN, sformovanykh plazmovo-elektrolitychnym oksyduvannyam [Corrosion and physical and mechanical properties of coatings on AK12M2MgN alloy formed by plasma electrolytic oxidation]. Fizyko-khimichna mekhanika materialiv. 2019. T. 55, № 5. S. 74–83.

36. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V. Peculiarities of cobalt containinh okhide coatinh formation on silumin. Ukrainian Chemical Journal. 2020. T. 86, № 1. S. 12–21. doi: 10.33609/0041-6045.86.1.2020.12-21

37. Sposib formuvannya katalitychno aktyvnykh pokryttiv oksydami manhanu ta kobal'tu na ventyl'nykh metalakh [Method of forming catalytically active coatings with manganese and cobalt oxides on valve metals]: pat. 114681 Ukrayina: C25D 11/12, C25D 11/06, C25D 3/12, B01Y 37/34; № a201603850; zayavl.; 11.04.2016, opubl. 10.07.2017, Byul. № 13.

38. Sposib formuvannya katalitychno aktyvnykh kobal'tovmisnykh oksydneykh pokryviv na alyuminiyi ta yoho lehovanykh splavakh [A method of forming catalytically active cobalt-containing oxide coatings on aluminum and its alloyed alloys]: pat. 114686 Ukrayina: MPK: C25D3/12, C25D11/06, B01Y37/34; № a201605836; zayavl.; 30.05.2016; opubl. 10.07.2017; Byul. № 13.

39. Elektrolit dlya formuvannya katalitychno aktyvnykh kobal'tovmisnykh oksydneykh pokryviv na alyuminiyi ta yoho lehovanykh splavakh [Electrolyte for the formation of catalytically active cobalt-containing oxide coatings on aluminum and its alloyed alloys]: pat. 115955 Ukrayina: MPK C25D 3/12, C25D11/02, C25D11/04, C25D11/06. № a201605066; zayavl.; 06.05.2016; opubl. 10.05.2017, Byul. № 9.

40. Sposib oderzhannya katalizatoru vnutrishn'otsylindrovoho katalizu v dvyhunakh vnutrishn'oho zhoryannya [The method of obtaining a catalyst for intracylinder catalysis in internal combustion engines]: pat. 116114 Ukrayina: MPK

F02B51/02, F02B77/02, C25D11/02, C25D11/04. № u201611439; zayavl. 11.11.2016; opubl. 10.05.2017, Byul. № 9.

41. Sposib znyzhennya toksychnosti hazovykh vykydiv dvyhuniv vnutrishn'oho z·horyannya [A method of reducing the toxicity of gaseous emissions from internal combustion engines]: pat. 116176 Ukrayina: MPK F02B51/02, F02B77/02, C25D11/02, C25D11/04. № u201611981; zayavl. 25.11.2016; opubl. 10.05.2017, Byul. № 9.

42. Sposib obrobky porshniv dvyhuniv vnutrishn'oho z·horyannya [A method of processing the pistons of internal combustion engines]: pat. 117765 Ukrayina: MPK C25D11/04, F02F 3/10. № u201700072; zayavl.; 03.01.2017, opubl. 10.07.2017, Byul. № 13.

43. Porshen' dvyhuna vnutrishn'oho z·horyannya z katalitychnym termostiykym pokryttyam [Piston of an internal combustion engine with a catalytic heat-resistant coating]: pat. 135696 Ukrayina, F02F 3/00, F02F 3/10, C25D 11/04. № u201901473; zayavl. 14.02.2019, opubl. 10.07.2019, Byul. № 13.

44. Method of formation of oxide nanodisperse coatings on aluminium alloys: pat. 4978 Republic of Kazakhstan, C25D 3/12, C25D 11/02, C25D 11/04, C25D 11/06. 2019/1012.2; declar. 18.11.2019, publ. 29.05.2020, Bul. № 21.

45. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyi A. S. Mikroduhove oksyduvannya detaley porshnevoyi hrupy DVZ [Microarc oxidation of parts of the piston group of the internal combustion engine]. Khimichni problemy s'ohodennya: zb. tez dop. Dev"yatoyi Ukrayins'koyi naukovoyi konf. z mizh nar. uchastyu. (Vinnytsya, 29–30 bereznya 2016 r.). Vinnytsya: TOV «Nilan-LTD», 2016. S. 190.

46. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyi A. S. Shlyakhy pidvyshchennya ekonomichnosti ta ekolohichnosti DVZ avtomobil'noyi i bronetankovoyi tekhniki [Ways to increase the efficiency and environmental friendliness of internal combustion engines of automobiles and armored vehicles]. Naukove zabezpechennya sluzhbovo-boyovoyi diyal'nosti Natsional'noyi hvardiyi Ukrayiny. Sektsiya 2. Naukove zabezpechennya protsesiv rozroblennya,

udoskonalennya, ekspluatatsiyi ta remontu zrazkiv ozbroynnya, viys'kovoyi ta spetsial'noyi tekhniky : zb. tez dop. VII naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (Kharkiv, 31 bereznya 2016 r.). Kharkiv : NANHU, 2016. S. 59–60.

47. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyi A. S. Osoblyvosti formuvannya PEO-pokryviv nestekhiometrychnymy oksydami manhanu ta kobal'tu [Features of formation of PEO-covers by nonstoichiometric oxides of manganese and cobalt]. “Khimichni Karazins'ki chytannya – 2016” : tezy dop. VIII Vseukrayins'koyi naukovoyi konf. (Kharkiv, 18–20 kvitnya 2016 r.). Kharkiv : KhNU, 2016. S. 164 – 165.

48. Karakurkchi H. V, Ved' M. V., Sakhnenko M. D., Horokhivs'kyi A. S. Pidkhody shchodo pidvyshchennya palyvnoyi ekonomichnosti DVZ viys'kovoyi tekhniky [Approaches to increase fuel efficiency of military equipment]. Perspektyvy rozvytku ozbroynnya ta viys'kovoyi tekhniky Sukhoputnykh viys'k : zb. tez dop. Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi. (L'viv, 18–20 travnya 2016 r.). L'viv: NASV, 2016. S. 38–39.

49. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyi A. S. Formirovanie kataliticheski aktivnykh pokrytivy oksidami kobalta na alyumo-kremnievykh splavah [Formation of catalytically active coatings with cobalt oxides on aluminum-silicon alloys]. Suchasni tekhnolohiyi u promyslovomu vyrobnytstvi : mater. ta prohr. IV Vseukr. mizhvuz. nauk.-tekh. konf. u 2 ch. (Sumy, 19–22 kvitnya 2016 r.). Sumy: SumDU, 2016. Ch. 2. S. 101–102.

50. Horokhyvskyy A. S. Karakurkchy A. V, Sakhnenko N. D., Ved' M. V. Osobennosti formirovaniya oksidnykh kataliticheskikh pokrytivy na detalyah porshnevoyi gruppyi DVS [Features of the formation of oxide catalytic coatings on the parts of the internal combustion engine piston group]. Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: Tezy dop. XXIV mizh nar. nauk.-prakt. konferentsiyi. (Kharkiv 18–20 travnya 2016r.). Kharkiv: NTU «KhPI», 2016.

51. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A. S. Nanostructured catalytic cobalt containing PEO-coatings on alloy AL25.

Chemistry, physics and technology of surface: Proceedings of Ukrainian conference with international participation and Workshop “Nanostructured biocompatible / bioactive materials” (Kyiv, 17–18 May 2016). Kyiv, 2016. C. 160.

52. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A. S., Galak A. V. Nanoscale oxide PEO-coatings forming from pyrophosphate electrolytes. IV International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2016) (Lviv, Ukraine, 24–27 August 2016). Lviv, 2016. P. 320.

53. Ved M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V. Mixed cobalt containing PEO-coatings on aluminium alloy. *Sovremennyye problemy fiziki kondensirovannogo sostoyaniya, nanotekhnologiy i nanomaterialov : sb. trudov IV Mezhdunar. nauch. konf. (Almatyi, 10–12 oktyabrya 2016 h.)*. Almatyi, 2016. S. 40–44.

54. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved M. V. Oksidnyie kataliticheskie sistemyi v tehnologiyah povyisheniya toplivnoy ekonomichnosti porshnevnykh DVS [Oxide catalytic systems in technologies for increasing the fuel efficiency of piston internal combustion engines]. *Novitni tekhnolohiyi v avtomobilebuduvanni, transporti i pry pidhotovtsi fakhivtsiv : mizhnar. nauk.-prakt. ta nauk.-metod. konf. (Kharkiv, 20–21 zhovtnya 2016 r.)*. Kharkiv: KhNADU, 2016. S. 211.

55. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyy A. S. Vnutrishn'otsylindrovyy kataliz yak pidkhid do ekolohizatsiyi DVZ [Intra-cylinder catalysis as an approach to greening the internal combustion engine]. *Problemy zabrudnennya ta ochystky povitrya: kontrol', monitorynh, katalitychni, fotokatalitychni ta sorbtsiyini metody ochystky : mater. Ukrayino-Pol's'koyi konf. (m. Kyiv, 6–8 lystopada 2016 r.)*. Dnipro: Serednyak T.K., 2016. S. 61–62.

56. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Nanorozmirni oksydni katalitychni systemy na splavakh alyuminiyu [Nanoscale oxide catalytic systems on aluminum alloys]. *Aktual'ni problemy khimiyi i khimichnoyi tekhnolohiyi : mater. II vseukr. nauk.-prakt. konf. (m. Kyiv, 21–23 lystopada 2016 r.)*. K.: NUKhT, 2016. S. 134–135.

57. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Eksperymental'ne doslidzhennya formuvannya oksydneykh pokryviv na detalyakh porshnevoyi hrupy DVZ [Experimental study of the formation of oxide coatings on the parts of the piston group of the internal combustion engine]. Naukove zabezpechennya sluzhbovo-boyovoyi diyal'nosti Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy. Sektsiya 2. Naukove zabezpechennya protsesiv rozroblennya, udoskonalennya, ekspluatatsiyi ta remontu zrazkiv ozbroyennya, viys'kovoyi ta spetsial'noyi tekhniky : zb. tez dop. VIII naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (Kharkiv, 30 bereznya 2017 r.). Kharkiv : NANHU, 2017. S. 92–93.

58. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Vplyv rezhymu obrobky syluminiv na morfolohiyu kobal'tovmisnykh PEO-pokryviv [Influence of silumin treatment regime on morphology of cobalt-containing PEO coatings]. Suchasni tekhnolohiyi u promyslovomu vyrobnytstvi : materialy nauk.-tekhn. konf., (Sumy, 18–21 kvitnya 2017 r.). Sumy : SDU, 2017. Ch. 2. S. 110–111.

59. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyy A. S., Yaroshok T. P. Osoblyvosti formuvannya PEO-pokryviv nestekhiometrychnymy oksydami kobal'tu na splavakh Al-Si [Features of formation of PEO-coatings by nonstoichiometric cobalt oxides on Al-Si alloys]. “Khimichni Karazins'ki chytannya – 2017” (KhKCh–2017) : tezy dop. IX Vseukrayins'koyi naukovoyi konf.. (Kharkiv, 18–20 kvitnya 2017 r.). Kharkiv : KhNU, 2017. S. 16–17.

60. Karakurkchi A. V, Sakhnenko N.D., Ved M. V., Gorohivskiy A. S., Osobennosti formirovaniya dopirovannykh oksidami perehodnykh metallov PEO-pokryvitiy na AK12Mg2N [Features of the formation of PEO coatings doped with transition metal oxides on AK12Mg2N]. Aktual'ni zadachi khimiyi: doslidzhennya ta perspektyvy : mater. Vseukr. nauk. konf. (Zhytomyr, 17–18 travnya 2017 r.). Zhytomyr: ZhDU im. I.Franka, 2017. S. 61–64.

61. Karakurkchi H. V, Ved' M. V., Sakhnenko M. D., Halak O. V., Men'shov S. M., Matykin O. V., Rudnyeva S. I. Oksydni katalitychni systemy na ventyl'nykh metalakh v ekotekhnolohiyakh [Oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies]. “AVIA–2017” : Mater. XIII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. (Kyyiv,

19-21 kvitnya 2017 r.). Kyiv : NAU, 2017. S. 27.40–27.44.

62. Karakurkchi A. V. Catalytic PEO-coatings on valve metals. Streszczenia XIV Warszawskie Seminarium Doktorantów Chemików (Warszawa, 9 czerwca 2017). Warszawa, 2017. S. 100.

63. Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Ved' M. V., Mayba M. V. Effect of doping metals on the structure of PEO coatings on Ti. V International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2017) (Chernivtsi, Ukraine, 23–26 August 2017). Chernivtsi, 2017. P. 414.

64. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M.V., Horokhivs'kyi A.S. Dopovani kobal'tom oksydni pokryvy na ventyl'nykh metalakh [Cobalt-doped oxide coatings on valve metals]. Problemy koroziyno-mekhanichnoho ruynuvannya, inzheneriya poverkhni, diahnostychni systemy: materialy XXV Vidkrytoyi naukovo-tekhnichnoyi konf. (L'viv, 27–29 zhovtnya 2017 r.). L'viv: FMI im. H.V. Karpenka NAN Ukrayiny, 2017. S. 123–126.

65. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Zastosuvannya oksydno-metalevykh katalizatoriv dlya vnutrishn'o-tsyliandrovoho katalizu DVZ [Application of oxide-metal catalysts for intra-cylinder catalysis of internal combustion engines]. Naukove zabezpechennya sluzhbovo-boyovoyi diyal'nosti Natsional'noyi hvardiyi Ukrayiny. Sektsiya 2. Tekhnichne zabezpechennya sluzhbovo-boyovoyi diyal'nosti Natsional'noyi hvardiyi Ukrayiny: suchasnyy suchasnyy stan, problemy ta perspektyvy: zb. tez dop. naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (Kharkiv, 29 bereznya 2018 r.). Kharkiv : NANHU, 2018. S. 42–43.

66. Karakurkchi H. V, Horokhivs'kyi A. S., Men'shov S. M., Matykin O. V. PEO-obrobka porshnevoho syluminu AK12M2MgN u luzhnykh elektrolitakh [PEO-treatment of piston silumin AK12M2MgN in alkaline electrolytes]. Zbirka tez dopovidey XIII I Vseukrayins'koyi konf. z aktual'nykh pytan' khimiyi (m. Kharkiv, 2–4 travnya 2018 r.) Kharkiv: Eksklyuzyv, 2018 r. S. 74.

67. Karakurkchi H. V, Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Perspektyvy zastosuvannya PEO-pokryviv na ventyl'nykh metalakh v ekolohichnomu katalizi [Prospects for the use of PEO coatings on valve metals in environmental catalysis].

Khimiya, ekolohiya ta osvita : zb. nauk. prats' II Mizhnar. nauk.-prakt. int.-konf. (Poltava, 15–16 travnya 2018 r.). Poltava, 2018. S. 34–38.

68. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivs'kyi A. S. Osoblyvosti plazmovo-elektrolitychnoyi obrobky syluminiv u luzhnykh elektrolitakh [Features of plasma-electrolytic treatment of silumins in alkaline electrolytes]. Prykladni aspekty elektrokhimichnoho analizu : zb. nauk. prats' VIII Ukrayins'koho z"yizdu z elektrokhimiyyi. (L'viv, 4–7 chervnya 2018 r.) T. 2. S. 282–284.

69. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Mayba M. V. Nanostructured mixed oxide coatings incorporated by transition and refractory metals on silumin. VI International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2018) (Kyiv, Ukraine, 27–30 August 2018). Kyiv, 2018. P. 580.

70. Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Karakurkchi H. V. Inversiya strukturnoyi matrytsi kompozytu – shlyakh do poshuku novykh znan' [Inversion of the structural matrix of the composite is a way to search for new knowledge]. XX Ukrayins'ka konferentsiya z neorhanichnoyi khimiyyi za uchastyu zakordonnykh uchenykh: tezy dop. (Dnipro, 17–20 veresnya 2018 r.). Dnipro: LIRA, 2018. S. 142.

71. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Halak O. V., Men'shov S. M., Matykin O. V. Oksydno-metalevi katalitychni systemy na splavakh alyuminiyu ta tytanu dlya ekotekhnolohiy [Oxide-metal catalytic systems on aluminum and titanium alloys for eco-technologies]. Science and society : The 8th International conference. (Hamilton, November 9, 2018). Hamilton, Canada, 2018. P. 504–515.

72. Karakurkchi H. V., Kaydalov R. O. Oksydni katalitychni systemy v tekhnolohiyakh pidvyshchennya palyvnoyi ekonomichnosti porshnevykh dvyhuniv vnutrishn'oho z'horyannya [Oxide catalytic systems in technologies of increase of fuel efficiency of reciprocating internal combustion engines]. Naukove zabezpechennya sluzhbovo-boyovoyi diyal'nosti Natsional'noyi hvardiyi Ukrayiny.

Sektsiya 2. Tekhnichne ta tylove zabezpechennya sluzhbovo-boyovoyi diyal'nosti Natsional'noyi hvardiyi Ukrayiny: suchasnyy suchasnyy stan, problemy ta perspektyvy: zb. tez dop. nauk.-prakt. konf. (Kharkiv, 29 bereznya 2018 r.). Kharkiv : NANHU, 2018. S. 42–43.

73. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Elektrokhimichna obrobka splaviv alyuminiyu iz formuvanniam PEO-pokryviv, dopovanykh perekhidnym metalamy [Electrochemical treatment of aluminum alloys with the formation of PEO coatings doped with transition metals]. «Khimichni Karazins'ki chytannya – 2019» (KhKCh–2019) : tezy dop. KhI Vseukrayins'koyi naukovoyi konf. (Kharkiv, 22–24 kvitnya 2019 r.). Kharkiv : KhNU, 2019. S. 139.

74. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Mayba M. V., Ovcharenko O. O. Metaloksydni systemy: syntezy i modelyuvannya [Metal oxide systems: synthesis and modeling]. Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: Tezy dopovidey XXVII mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi, Ch. II (15–17 travnya 2019 r., Kharkiv). Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. S. 263.

75. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V. PEO-pokryvy na splavakh alyuminiyu v tekhnolohiyakh ekolohichnoho katalizu [PEO-coatings on aluminum alloys in technologies of ecological catalysis]. Suchasni informatsiyi ta innovatsiyi tekhnolohiyi na transporti (MINTT–2019): Materialy XI Mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi (Kherson, 28–30 travnya 2019 r.). Kherson : KhDMA, 2019. S. 365–366.

76. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V. Faktory vplyvu na morfolohiyu ta sklad PEO-pokryviv na splavakh alyuminiyu [Factors influencing the morphology and composition of PEO coatings on aluminum alloys]. L'vivs'ki khimichni chytannya: Zbirnyk naukovykh prats XVII naukovoyi konferentsiyi (L'viv, 2–5 chervnya 2019 r.). L'viv : LNU im. I. Franka, 2019. S. M6.

77. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Bohdanova K. B., Stepanova I. I. Morphology and phase composition of nanostructured PEO-coatings on valve metals. International research and practice conference:

Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019) (Lviv, Ukraine, 27–30 August 2019). Lviv, 2019. P. 473.

78. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Bohdanova K. B. Funktsional'ni PEO-pokryvy na splavakh alyuminiyu dlya ekotekhnolohiy [Functional PEO-covers on aluminum alloys for ecotechnologies]. Problems of Materials Stsientse and Surfatsе Enhineerinh (MSSE-2019): Problems of Materials Science and Surface Engineering (MSSE-2019):Conference abstracts of Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (25-27 veresnya 2019 roku, L'viv). FMI NAN Ukrayiny, 2019. S. 131–134.

79. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Mayba M. V. Doslidzhennya fraktal'nosti heterooksydnykh pokryttiv na splavakh alyuminiyu [Investigation of fractality of heterooxide coatings on aluminum alloys]. «Khimichni Karazins'ki chytannya – 2020»: tezy dop. XII Vseukrayins'koyi nauk. konf. (Kharkiv, 21–23 kvitnya 2020 r.). Kharkiv : KhNU, 2020. S. 132–133.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ГЕТЕРООКСИДНИХ ПОКРИТТІВ НА ВЕНТИЛЬНИХ МЕТАЛАХ ТА СПЛАВАХ ДЛЯ ЕКОТЕХНОЛОГІЙ.....	15
1.1 Каталітичні матеріали для екотехнологій: характеристика та галузі застосування.....	16
1.2 Використання плазмо-електролітного оксидування для формування функціональних покриттів.....	29
1.3 Особливості плазмо-електролітної обробки сплавів алюмінію (титану).....	41
1.4 Модельні уявлення щодо плазмо-електролітного формування оксидних покриттів.....	50
1.5 Обґрунтування напряму досліджень.....	55
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	57
2.1 Понятійний апарат.....	57
2.2 Об'єкти досліджень.....	61
2.3 Робочі розчини, електроліти та модельні середовища.....	65
2.4 Лабораторне устаткування.....	68
2.5 Режими плазмо-електролітного формування.....	69
2.6 Методи досліджень.....	70
2.7 Аналіз результатів вимірювань.....	80
РОЗДІЛ 3 ГОМОГЕНІЗАЦІЯ ПОВЕРХНІ ЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТА ФОРМУВАННЯ ОКСИДНОЇ МАТРИЦІ МЕТАЛУ-НОСІЯ.....	81
3.1 Закономірності анодної поведінки сплавів алюмінію у розчинах дифосфатів.....	82
3.2 Моделювання поверхневої гомогенізації сплавів алюмінію.....	96

3.3	Рациональні режими і склад електролітів для гомогенізації поверхні.....	115
3.3	Особливості формування монооксидних шарів на сплавах титану....	120
3.5	Схеми гомогенізації поверхні легованих сплавів.....	126
3.6	Висновки.....	130
РОЗДІЛ 4 ЗАКОНОМІРНОСТІ ПЛАЗМО-ЕЛЕКТРОЛІТНОГО ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРООКСИДНИХ ПОКРИТТІВ НА СПЛАВАХ АЛЮМІНІЮ (ТИТАНУ).....		
4.1	Гетерооксидні системи $Al Al_2O_3 \cdot MnO_x, Ti TiO_2 \cdot MnO_x$	135
4.2	Гетерооксидні системи $Al Al_2O_3 \cdot CoO_y, Ti TiO_2 \cdot CoO_y$	166
4.3	Змішані оксидні системи $Al Al_2O_3 \cdot MnO_x, CoO_y$	196
4.4	Висновки.....	199
РОЗДІЛ 5 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРООКСИДНИХ ПОКРИТТІВ.....		
5.1	Топографія поверхні.....	202
5.2	Фізико-механічні властивості.....	215
5.3	Корозійна стійкість оксидованих сплавів.....	227
5.4	Каталітичні властивості.....	240
5.5	Висновки.....	251
РОЗДІЛ 6 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРООКСИДНИХ ПОКРИТТІВ.....		
6.1	Характеристика технологічного процесу ПЕО.....	256
6.2	Варіативність схем технологій гетерооксидних покриттів.....	264
6.3	Рекомендації щодо практичного використання оксидних покриттів..	269
6.4	Висновки.....	273
ВИСНОВКИ.....		
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		
ДОДАТКИ.....		
		335