

Наукові основи механохімічного УЗУО-синтезу зносостійких покриттів конструкційних сплавів авіаційної техніки для підвищення військової спроможності

Научные основы механохимического УЗУО-синтеза износостойких покрытий конструкционных сплавов авиационной техники для повышения военной способности

Scientific bases of mechanochemical UIT-synthesis of wear-resistant coverings of structural alloys of aviation equipment for increase of military ability

1. Номер державної реєстрації, номер реєстрації в університеті.

0118U000220

2. Науковий керівник - д.ф.-м.н., проф. Волошко Світлана Михайлівна, Волошко Светлана Михайловна, Voloshko Svitlana.

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.) Запропоновано новий підхід для створення композиційних зносостійких покриттів, який полягає у реалізації переваг об'єднання ефекту механічної нанокристалізації і перебігу механохімічних реакцій у приповерхневих шарах оброблюваних ультразвуковою ударною обробкою (УЗУО) матеріалів у хімічно-активних та інертних середовищах. Це принципово відрізняє запропоновану методику від відомих методів синтезу об'ємних композиційних матеріалів і забезпечує більш ефективне, порівняно із термічним обробленням та стандартними схемами УЗУО, зміцнення поверхні. Визначені критерії впливу різних технологічних режимів УЗУО на структурно-фазові перетворення, концентраційні неоднорідності, пошарову еволюцію структури, механічні властивості, жаростійкість, зносостійкість та корозійну стійкість композиційних покриттів, сформованих втіленням у поверхневі шари конструкційних сплавів (сталі, латуні, титанові та алюмінієві сплави) дисперсних частинок Ti, Ni, Zr, Al₂O₃, B₄C, BN тощо. Відпрацьовані технологічні режими комбінованого впливу УЗУО та електроіскрової або лазерної обробок. Проведені дослідження забезпечують практичні можливості підвищення ефективності процесів модифікації поверхні конструкційних сплавів та збільшення експлуатаційного ресурсу виробів, а саме: зміцнення поверхні та підвищення зносостійкості до 6 разів, збільшення товщини модифікованого шару від 500 мкм до мм, зменшення тривалості процесів обробки поверхневих шарів матеріалу до декількох десятків секунд, зниження питомих енерговитрат на ~30%. Щодо підвищення жаростійкості, то найкращий ефект досягнуто для титанового сплаву ВТ6 після УЗУО з порошком β-Si₃N₄ – втрата маси після циклічного відпалу за температури 650°C сумарною тривалістю 50 годин зменшується втричі.

(рос.) Предложен новый подход для создания композиционных износостойких покрытий, который заключается в реализации преимуществ объединения эффекта механической нанокристаллизации и протекания механохимических реакций в приповерхностных слоях обрабатываемых ультразвуковой ударной обработкой (УЗУО) материалов в химически активных и инертных средах. Это принципиально отличает предлагаемую методику от известных методов синтеза объемных композиционных материалов и обеспечивает более эффективное по сравнению с термической обработкой и стандартным схемам УЗУО, упрочнения поверхности. Определены критерии влияния различных технологических режимов УЗУО на структурно-фазовые превращения, концентрационные неоднородности, послойную эволюцию структуры, механические свойства, жаростойкость, износостойкость и коррозионную стойкость композиционных покрытий, сформированных внедрением в поверхностные слои конструкционных сплавов (стали, латуни, титановые и алюминиевые сплавы) дисперсных частиц Ti, Ni, Zr, Al₂O₃, B₄C, BN и т.п. Отработаны технологические режимы комбинированного воздействия УЗУО и электроискровой или лазерной обработок. Проведенные исследования обеспечивают

практические возможности повышения эффективности процессов модификации поверхности конструкционных сплавов и увеличение эксплуатационного ресурса изделий, а именно: упрочнения поверхности и повышения износостойкости в 6 раз, увеличение толщины модифицированного слоя от 500 мкм до 2 мм, уменьшение продолжительности процессов обработки поверхностных слоев материала до нескольких десятков секунд, снижение удельных энергозатрат на ~ 30%. Максимальный эффект повышения жаростойкости достигнут для титанового сплава ВТ6 после УЗУО с порошком β -Si₃N₄ - потеря массы после циклического отжига при температуре 650 °С суммарной продолжительностью 50 часов уменьшается втрое.

(eng.) A new approach to the creation of composite wear-resistant coatings is proposed, which consists in realizing the advantages of combining the effect of mechanical nanocrystallization and mechanochemical reactions in the near-surface layers treated with ultrasonic impact treatment (UIT) in chemically active and inert media. This fundamentally distinguishes the proposed technique from the known methods of synthesis of bulk composite materials and provides more effective, compared to heat treatment and standard UIT schemes, surface hardening. Criteria for the influence of different technological modes of UIT on structural-phase transformations, concentration inhomogeneities, layer-by-layer evolution of structure, mechanical properties, heat resistance, wear resistance and corrosion resistance of composite coatings formed by embodiment in surface layers of structural alloys (steel, brass, titanium, titanium) particles of Ti, Ni, Zr, Al₂O₃, B₄C, BN and the like. The technological modes of combined influence of UIT and electrospark or laser processing are worked out. The research provides practical opportunities to increase the efficiency of surface modification of structural alloys and increase the service life of products, namely: surface hardening and wear resistance up to 6 times, increasing the thickness of the modified layer from 500 μ m to 2 mm, reducing the duration of surface layers to several tens seconds, reducing specific energy consumption by ~ 30%. Regarding the increase of heat resistance, the best effect was achieved for Ti-6Al-4V alloy after ultrasonic powder with β -Si₃N₄ powder - weight loss after cyclic annealing at 650 °C for a total duration of 50 hours is reduced by three times.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

- Спосіб ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь: пат. на корисну модель №139777 – Україна: МПК (2019.01) G01N 24/00, G01N 25/00, G01N 27/00 / Мордюк Б.М., Васильєв М.О., Сидоренко С.І., Волошко С.М., Бурмак А.П.; заявник і патентовласник КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, – № 139777; заявл. 24.05.19; опублік. 27.01.20, Бюл. №2.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=265374>

- Спосіб низькотемпературного деформаційного азотування поверхневих шарів металевих виробів № 141320 Україна: МПК (2019.01) G01N 24/00, G01N 25/00, G01N 27/00 / Васильєв М.О., Мордюк Б.М., Сидоренко С.І., Волошко С.М., Бурмак А.П.; заявник і патентовласник КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, – № 141320; заявл. 24.05.19; опублік. 10.04.20, Бюл. №7.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=267365>

- М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак. Технологія синтезу деформаційних наноконкомпозитів на поверхні легких конструкційних сплавів ультразвуковим ударним обробленням в різних середовищах, твір наукового характеру №69804 (зареєстровано в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права 17.01.2017).

- М.А. Васильєв, Б.Н. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак. Механічне легування поверхні алюмінієвого сплаву Д16 ультразвуковим обробленням залізним бойком в різних середовищах, твір наукового характеру №69803 зареєстровано в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права 17.01.2017).

- Волошко С.М., Васильєв М.О., Мордюк Б.М., Бурмак А.П. “Синтез зносостійких покриттів ультразвуковою ударною обробкою сталі 12X18H10T у нейтральних та хімічно активних середовищах”. Літературний письмовий твір наукового характеру, свідоцтво № 78840 (zareestrovano в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права 05.05.2018).

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Роботу виконано у відповідності до сучасних високих світових наукових стандартів, а результати роботи відповідають світовим аналогам, висвітлені в монографіях та статтях, що індексуються міжнародною базою даних Scopus, захищені відповідними охоронними документами на об’єкти права інтелектуальної власності.

6. Економічна привабливість для просування на ринок.

Економічний ефект від використання результатів проекту значно перевищить витрати завдяки тому, що в одному технологічному процесі будуть поєднані: синтез багатокомпонентного покриття, його механічна зміцнююча обробка з наноструктуризацією поверхні, деформаційне заліковування пор у поверхневих шарах, наведення стискаючих напружень та одночасне зменшення шорсткості поверхні за відсутності проблеми адгезії покриття до основи. Зазвичай це окремі стадії виробництва та відновлення вузлів деталей машинобудування. Попередня УЗУО Al, Ti - сплавів перед хромуванням значно збільшить їх експлуатаційний ресурс. В перспективі відкривається можливість атермічної обробки поверхні сплавів, які мають пасивуючий оксидний шар, взагалі без хромування, що є позитивним кроком з точки зору екологічної безпеки. Швидкоплинна УЗУО може стати економічно вигідною альтернативою довготривалим релаксаційним відпалам масивних зварних конструкцій машинобудування. Передбачається збільшення довговічності деталей та відповідне зменшення витрат на матеріали. Термін окупності 2 роки. УЗУО не вимагає складного технологічного обладнання, швидке відновлення ушкоджених поверхонь може здійснюватися у будь-яких, зокрема польових, умовах.

7. Потенційні користувачі.

Заплановане впровадження ультразвукової ударної обробки корпусних деталей суден з конструкційних сплавів під час проведення будівельних та ремонтних робіт у структурних підрозділах ПрАТ «УКРАЇНСЬКЕ ДУНАЙСЬКЕ ПАРОПЛАВСТВО» (Міністерство транспортної інфраструктури): Відокремлений госпрозрахунковий структурний Підрозділ «Ізмаїльська база технічного обслуговування флоту» та Госпрозрахунковий відокремлений структурний Підрозділ «Кілійський суднобудівельно-судноремонтний завод». Інші можливі користувачі: ТОВ «Нано Технології в Медицині», ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, ТОВ «Патон Турбайн Технолоджиз», ПАТ "МОТОР СІЧ"; ДП «Антонов»; ДП «Завод 410 цивільної авіації»; ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка А.Г. Івченка.

8. Стан готовності розробки.

Відпрацьовані режими комбінованої обробки поверхневих шарів металевих сплавів в різних середовищах та методики формування композиційних покриттів із підвищеною мікротвердістю (до 5 разів); розроблені практичні рекомендації для застосування розроблених методик на підприємствах авіаційної техніки та машинобудування. Технологія готова до впровадження.

9. Існуючі результати впровадження.

Заключений договір щодо запровадження ультразвукової ударної обробки корпусних деталей суден під час проведення будівельних та ремонтних робіт на структурних підрозділах ПрАТ «УКРАЇНСЬКЕ ДУНАЙСЬКЕ ПАРОПЛАВСТВО» та проведено її дослідно-промислово апробацію. За попередніми оцінками впровадження УЗУО – технології

дозволить досягти збільшення у 1,5 рази довговічності деяких видів обладнання та відповідного зменшення витрат на матеріали під час судноремонтних робіт (суднові двигуни, якірне обладнання, гвинтувальні комплекси та гребневі гвинти). Одержано лист-підтвердження від ПрАТ УДП на фінансування такого роду робіт.

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона, кафедра фізики металів
063-075-95-52 voloshkosvetlana13@gmail.com

11. Фото розробки

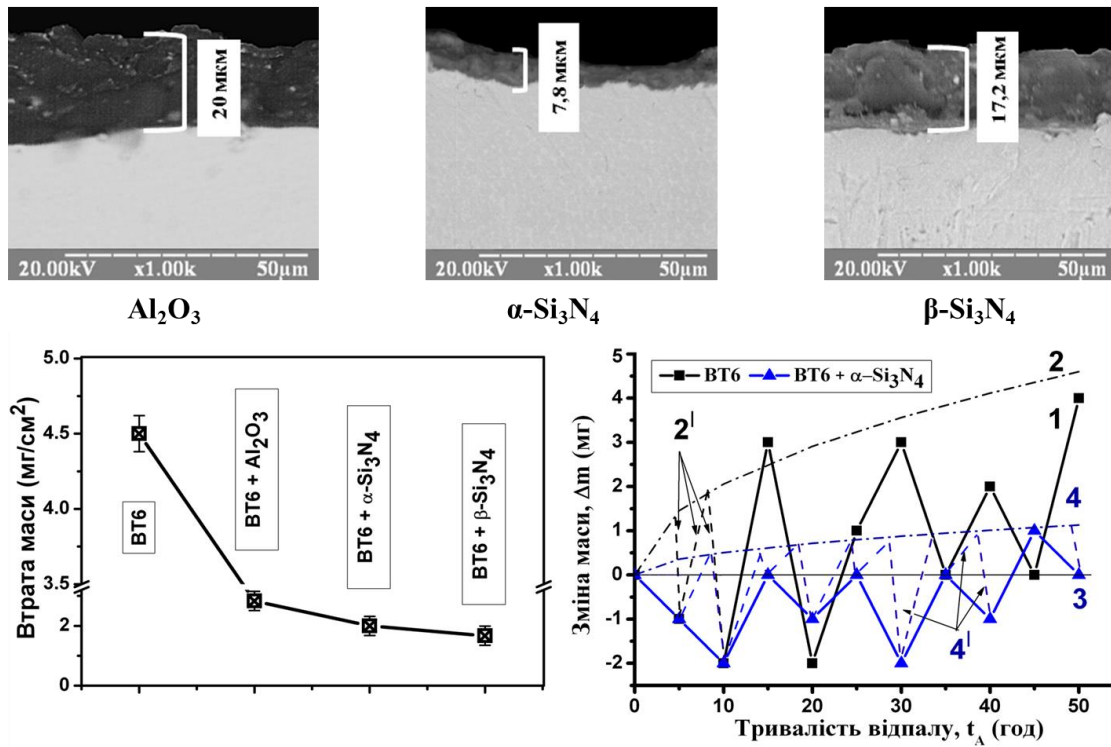


Рисунок 1 – Підвищення жаростійкості титанового сплаву ВТ6 застосуванням УЗУО з армуючими порошками

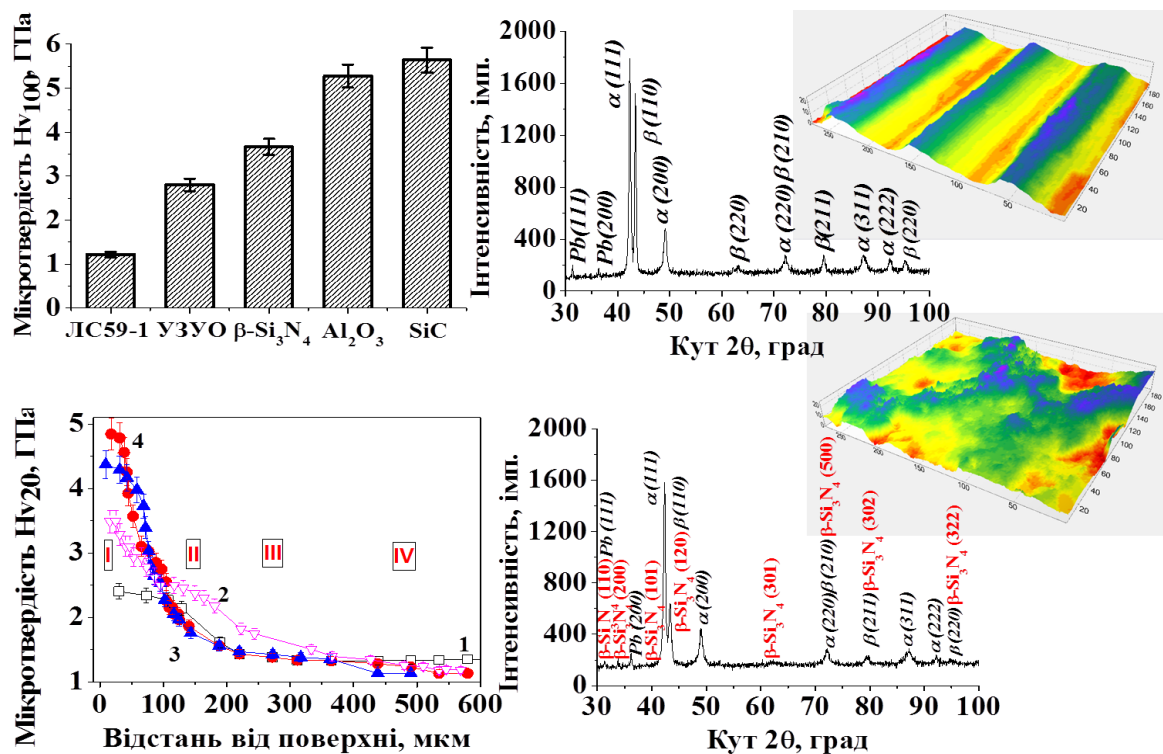


Рисунок 2 – Підвищення мікротвердості латуні LC59-1 застосуванням УЗУО з армуючими порошками

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання.

1. Б.М. Мордюк, Г.І. Прокопенко, С.М. Волошко, С.О. Соловей, І.М. Ключков, Г.О. Линник, Т.А. Красовський, М.В. Високолян, Ультразвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування: монографія / ред. Г.І. Прокопенка, Суми: Університетська книга, 2020. – 310 с. ISBN 978-966-680-968-4
2. Васильєв М.О., Волошко С.М., Яценко Л.Ф. Модифікація поверхні титанового сплаву ВТ6: ультразвук, лазер: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 253 с. ISBN 978-6139449057
3. С.І. Сидоренко, М.О. Васильєв, С.М. Волошко. Інженерія поверхні: способи зміцнення металевих поверхонь інтенсивною пластичною деформацією // Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х т. Т.1 / Редкол.: Л.М. Лобанов (голова) та ін.; НАН України. – Київ : Академперіодика, 2018. – С. 393-413.
4. Теорія тепло- та масопереносу в матеріалах [текст] : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 132 «Матеріалознавство», освітньою програмою «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» (протокол Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського № 6 від 7 вересня 2020 р.) / автори: С.І. Сидоренко, С.М. Волошко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 220 с. (С. 1-105).
5. Структура і властивості металів [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» (освітня програма «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання») / Серія «Педагогічне надбання : Ларіков Л.Н.» ; укладачі: Сидоренко С.І., Волошко С.М. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,98 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 326 с. (С. 201-326).
6. Сучасні експериментальні методики фізичного матеріалознавства [текст] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» спеціальності 132 «Матеріалознавство» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Волошко С.М., Крутько О.А., Франчік Н.В. – Київ : Видав-во «Навчальна література», 2020. – 100 с.

7. Сучасні експериментальні методи аналізу низькорозмірних структур [текст] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою “Металофізичні процеси та їх комп’ютерне моделювання” спеціальності 132 “Матеріалознавство” / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. : Волошко С.М., Крутько О.А., Франчік Н.В., А.П. Бурмак – Київ : Видав-во «Навчальна література», 2020. – 97 с.

8. M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, V.P. Bevz, S.M. Voloshko and O.B. Mordyuk. Ultrasonically nanostructured electric-spark deposited Ti surface layer on Ti6Al4V alloy: Enhanced hardness and corrosion resistance // *Int. J. Surface Science and Engineering*, 2020. - 14, No.1. - P.1-15. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2020.105874>

9. M.O. Vasylyev, V.K. Nosenko, I.V. Zagorulko, S.M. Voloshko. Nanocrystallization of amorphous Fe-based alloys under severe plastic deformation / *Progress in Physics of Metals*. – 2020. – №21. – P. – 319-344. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.319>

10. S.P. Chenakin, B.N. Mordyuk, N.I. Khripta. Surface characterization of a ZrTiNb alloy: Effect of ultrasonic impact treatment / *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 470. – P. 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.116>

11. M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, A.P. Burmak, I.O. Kruhlov, V.I. Zakiev. Characterization of ZrN coating low-temperature deposited on the preliminary Ar⁺ ions treated 2024 Al-alloy / *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – Vol. – 361. – P. 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.010>

12. D. Lesyk, H. Soyama, B. Mordyuk, S. Martinez, V. Dzhemelinskyy, N. Khripta, A. Lamikiz. Mechanical Surface Treatments of AISI 304 Stainless Steel: Effects on Surface Microrelief, Residual Stress, and Microstructure / *Journal of Materials Engineering & Performance*. – 2019. – Vol. 28, №9. –P. 5307–5322. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04273-y>

13. M.O. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, A.P. Burmak. Corrosion of 2024 alloy after ultrasonic impact cladding with iron / *Surface Engineering*. – 2018. – 34. – №4. – P. 324-329. <https://doi.org/10.1080/02670844.2017.1334377>

14. M.A.Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M.Voloshko, A.P. Burmak. Influence of microstructural features and deformation-induced martensite on hardening of stainless steel by cryogenic ultrasonic impact treatment / *Surface & Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 343. – P. 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.019>

15. M.A. Vasylyev, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, I.O. Kruhlov. Low-temperature synthesis of TiN coatings with preliminary treatment of the substrate surface with ion Ar⁺ / *NanoScience & NanoTechnology*. – 2018. – т.18, №2. – С. 33-38.

16. Б.М. Мордюк, О.О. Мікосянчик, Р.Г. Мнацаканов. Структурно-фазовий стан і зношування покриття Ni-Cr-B-Si-C на сталі 45 за умов тертя із зсувною компонентою навантаження / *Металлофізика и новейшие технологии*.– 2020. – т.42, №2. – С. 175–195. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.02.0175>

17. М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Д.В. Пефті. Модифікація поверхневих шарів латуні ЛС59-1 за умов високочастотної ударної деформації на повітрі та у інертному середовищі аргону / *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2020. – т.42, №3. – С. 381-400. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.03.0381>

18. М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Н.В. Франчік, Д.В. Пефті. Особливості структурно-фазового стану поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після високочастотного ударного оброблення в різних середовищах / *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2020. – т.42, №6. – С. 781-796. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.06.0781>

19. Б.М. Мордюк, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Д.С. Малахов. Модифікація поверхні сплаву АМг6 електроіскровим легуванням Си та ультразвуковою ударною обробкою для підвищення корозійної стійкості / *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2020. – т.42, №7. – С. 997–1013.

<https://doi.org/10.15407/mfint.42.07.0997>

20. А.П. Бурмак, Б.М. Мордюк, С.М. Волошко, В.І. Закієв, В.В. Могилко. Синтез композитних шарів на латуні ЛС59-1 ультразвуковою ударною обробкою / *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2020. – т.42, №9. – С.1245-1264.
<https://doi.org/10.15407/mfint.42.09.1245>
21. Б.М. Мордюк, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, В.В. Могилко, М.М. Ворон. Синтез композиційних покриттів ультразвуковою ударною обробкою титанового сплаву ВТ6 / *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2019. – т.41, №8. – С. 1067-1086.
<https://doi.org/10.15407/mfint.41.08.1067>
22. М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.М. Волошко, В.І. Закієв, А.П. Бурмак, Д.В. Пефті. Зміцнення поверхневих шарів латуні ЛС59-1 за умов витримки та високочастотної ударної деформації у рідкому азоті / *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2019. – т.41, №11. – С. 1499-1517. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.11.1499>
23. М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Д.В. Пефті. Структурно-фазовий стан поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після високочастотного ударного оброблення в рідкому азоті / *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2019. – т. 41, №12. – С. 1611-1629. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.12.1611>
24. М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, Г.І. Прокопенко, С.М. Волошко, Л.Ф. Яценко, Н.І. Хріпта. Механічні властивості, фазовий і хімічний склад поверхні стопу ВТ6 після УЗУО в хімічно активних та нейтральному середовищах / *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2018. – т.40, № 8. – С. 1029-1049. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.08.1029>
25. В.В. Могилко, А.П. Бурмак, М.М. Ворон, І.А. Владимирський, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, Б.М. Мордюк. Підвищення жаростійкості сплаву ВТ6 формуванням оксидних композитних шарів за ультразвукового ударного оброблення / *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2018. – т. 40, №11. – С. 1521-1537. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.11.1521>
26. O.V. Filatov and O.M. Soldatenko, Influence of Glide Dislocation Motion on Self-Diffusion in b.c.c. Fe. A Molecular Dynamics Study / *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, – 2020. – 42, No. 1. – P.1-9. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.01.0001>.

13. Надати ключові слова до розробки

Ультразвукова ударна обробка, зміцнення поверхні, покриття, зносостійкість, наноструктура, пластична деформація.