УДК 621.785.5:629.5.02 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.20

О. М. МЕЛЬНИК
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0001-9228-8459

О. А. ОНИЩЕНКО
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри управління судном
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0002-3766-3188

С. В. КУРДЮК
доктор філософії, старший науковий співробітник
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0002-3165-4571

О. М. МАСЛІЙ
доктор педагогічних наук, професор
Військова академія (м. Одеса)
ORCID: 0000-0003-2809-2763

В. В. ОЧЕРЕТНА
доцент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0003-4077-6711

КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ БАГАТОФАЗНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ У МОРСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті представлено результати комплексного чисельного моделювання впливу багатофазного зміцнення на поведінку поверхневих шарів конструкційних сталей в умовах морської експлуатації. Модель об'єднує три етапи поверхневої обробки: лазерне гартування, електроіскрове легування та cold spray-напилення. У роботі реалізовано підхід до аналізу термомеханічної взаємодії між зміцненими шарами, а також враховано електрохімічну активність матеріалів у солоній воді. Результати моделювання показали, що товщина cold spray-покриття суттєво впливає на розподіл залишкових напружень, а міжфазна різниця електродного потенціалу може призводити до гальванічної корозії при перевищенні критичного порогу 0.35 В. Побудовані графіки і 3D-профілі дають змогу точно ідентифікувати зони ризику локального руйнування внаслідок перевантаження або корозії. Запропонований підхід дозволяє не лише прогнозувати механічну поведінку багатофазного покриття під впливом навантаження, але й враховувати корозійні ризики, що виникають внаслідок потенціальної несумісності матеріалів шарів. Моделювання проводилося у середовищі COMSOL Multiphysics із залученням мультифізичних модулів, що охоплюють теплопровідність, напружено-деформований стан та електрохімічні процеси. Такий інтегрований підхід дає змогу оптимізувати конструкцію покриття та технологічні параметри зміцнення з урахуванням реальних умов експлуатації, що особливо важливо для техніки подвійного призначення морської, оборонної та енергетичної. Отримані результати мають практичне значення для проєктування зміцнених конструкцій технічних систем і обладнання, зокрема корпусних елементів, вузлів підводних апаратів, турбін, гвинтових передач та інших деталей, що працюють в агресивних середовищах.

Ключові слова: *багатофазне зміцнення, лазерне гартування, електроіскрове легування, cold spray, залишкові напруження, корозійна стійкість, морське середовище, термоупруге моделювання, морський транспорт, суднові конструкції, механізми та вузли, корпус судна, експлуатація технічних систем, гальванічна пара, антикорозійні покриття, зносостійкість, COMSOL Multiphysics, структурні сталі.*

O. M. MELNYK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0001-9228-8459

O. A. ONISHCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Ship Handling
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0002-3766-3188

S. V. KURDIUK
Doctor of Philosophy, Senior Researcher
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0002-3165-4571

O. M. MASLII
Doctor of Pedagogical Sciences, Professor
Military Academy (Odesa)
ORCID: 0000-0003-2809-2763

V. V. OCHERETNA
Associate Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-4077-6711

COMPREHENSIVE MODELING OF THE EFFECT OF MULTIPHASE HARDENING ON THE WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF STRUCTURAL STEELS IN MARINE ENVIRONMENTS

The paper presents the results of a comprehensive numerical modeling of the effect of multiphase hardening on the behavior of surface layers of structural steels in marine operation. The model combines three stages of surface treatment: laser hardening, electric spark alloying, and cold spray spraying. An approach to analyzing the thermomechanical interaction between the hardened layers was implemented, and the electrochemical activity of materials in salt water was taken into account. The simulation results showed that the thickness of the cold spray coating significantly affects the distribution of residual stresses, and the interfacial electrode potential difference can lead to galvanic corrosion when the critical threshold of 0.35 V is exceeded. The constructed graphs and 3D profiles allow us to accurately identify the risk areas of localized failure due to overload or corrosion. The proposed approach allows not only to predict the mechanical behavior of a multiphase coating under load, but also to take into account corrosion risks arising from potential incompatibility of layer materials. The modeling was performed in COMSOL Multiphysics using multiphysics modules covering thermal conductivity, stress-strain state, and electrochemical processes. This integrated approach makes it possible to optimize the design of the coating and technological parameters of hardening taking into account real operating conditions, which is especially important for dual-purpose equipment for marine, defense, and energy. The results obtained are of practical importance for the design of hardened structures of technical systems and equipment, including hull elements, submersible units, turbines, screw gears, and other parts operating in aggressive environments.

Key words: *multiphase hardening, laser hardening, electric spark alloying, cold spray, residual stresses, corrosion resistance, marine environment, thermoelastic modeling, marine transport, ship structures, mechanisms and components, ship hull, operation of technical systems, galvanic couple, anticorrosive coatings, wear resistance, COMSOL Multiphysics, structural steels.*

Вступ

Забезпечення довготривалої експлуатації вузлів та компонентів обладнання та устаткування яке експлуатується в морських умовах потребує впровадження ефективних методів захисту від інтенсивного зношування та корозії, викликаних агресивним середовищем. Солона вода, змінні температури, високий гідростатичний тиск і механічні навантаження створюють екстремальні умови для поверхневих шарів конструкційних сталей. Традиційні методи зміцнення не завжди забезпечують достатній рівень надійності, тому актуальним є використання комбінованих технологій, таких як послідовне лазерне гартування, електроіскрове легування та холодне напилення. Такі методи дозволяють створювати багатофазну мікроструктуру з локально орієнтованими властивостями, що відкриває нові можливості підвищення функціональної стабільності деталей у морському середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних досліджень свідчить про активний розвиток підходів до підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та структурної стабільності сталевих деталей за рахунок використання інноваційних технологій поверхневого зміцнення. Зокрема, велика увага приділяється впливу структури, фазового складу та геометрії мікрорельєфу на зносостійкість металів і сплавів [1, 2, 5]. Комплексна оптимізація процесів плавлення, модифікації та легування сталей демонструє перспективність високомарганцевих та метастабільних сплавів [3, 9].

У роботах [4, 10, 13] представлено ефективні математичні моделі, що дозволяють описати складні термодинамічні й технологічні процеси формування зміцнених шарів, включаючи електрохімічну поведінку й оптимізацію параметрів наплавлення. Окремі дослідження [6, 11] розкривають вплив складу покриттів і захисних шарів на їхню корозійну стійкість у агресивних середовищах, зокрема у морській воді.

Питання механічних властивостей, зносостійкості та характеристик плазмових і напилювальних покриттів також висвітлено у [7, 8, 12]. Роботи [12-15] акцентують на зв'язку між зміцненням, енергоефективністю та безпекою морських суден, підкреслюючи інтеграцію інженерних рішень зміцнення у ширший контекст морської техніки та екологічного менеджменту.

Постановка проблеми

Попри наявність численних робіт з окремих методів термічного зміцнення, недостатньо вивченим залишається питання взаємодії різних зміцнюючих технологій у багатофазному покритті та їхній спільний вплив на довготривалу корозійну та зносостійку поведінку. Особливо це стосується випадків, коли на поверхню деталі послідовно наносяться зміцнюючі шари з різними механічними і електрохімічними характеристиками. У таких умовах виникають складні градієнти напружень, фазові межі та гальванічні пари, які можуть як покращити, так і дестабілізувати структуру. Тому постає задача розробки інтегрованої моделі, що дозволяє передбачити поведінку багатофазного покриття в умовах морської експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка та реалізація математичної моделі, яка описує вплив комбінації методів лазерного, електроіскрового та холодного напилення на розподіл залишкових напружень, зносостійкість і корозійну поведінку багатофазних зміцнюючих покриттів на конструкційних сталях. Особливу увагу приділено ідентифікації зон підвищеної гальванічної активності та вивченню зв'язку між структурними параметрами шарів і їхньою довговічністю у морському середовищі.

Методика дослідження

Для досягнення поставленої мети розроблено комбіновану методику, яка поєднує аналітичне та чисельне моделювання фізико-механічних процесів у багатофазному поверхневому шарі. Було змодельовано три ключові етапи зміцнення:

– лазерне гартування як базова стадія з утворенням тонкого мартенситного шару глибиною 0.3–0.8 мм;

– електроіскрове легування (EIL) формування зміцнюючої зони з локально підвищеним вмістом тугоплавких карбідів або боридів;

– холодне газодинамічне напилення (cold spray) – створення зовнішнього антикорозійного шару товщиною 0.1–0.3 мм на основі NiCrAlY або WC-Co.

Механічна модель базується на рівняннях термоупругості з урахуванням багатошарової структури. Для опису міжфазних взаємодій та гальванічного ефекту використано метод ефективного середовища та потенціалів електрохімічної корозії.

Для оцінки розподілу залишкових напружень застосовано модифіковане рівняння:

$$\sigma_i(x) = E_i \alpha_i \int_0^t \frac{\partial T_i(x,\tau)}{\partial \tau} d\tau + \Delta\sigma_{interface}, \quad (1)$$

де i – індекс шару, $\Delta\sigma$ interface – внесок міжфазної взаємодії (різниця модулів пружності, коефіцієнтів розширення тощо).

Також проведено моделювання корозійного струму між шарами за формулою:

$$I_{corr} = \frac{E_{an} - E_{cat}}{R_{el} + R_{ct}}. \quad (2)$$

Це дозволяє визначити зони потенційної гальванічної деструкції у морській воді. Обчислення здійснювались у COMSOL Multiphysics з використанням мультифізичних зв'язків (тепло, напруження, електрохімія).

Викладення основного матеріалу дослідження

На основі чисельного моделювання розподілу залишкових напружень у багатошаровому зміцненому покритті встановлено, що кожен із шарів а саме лазерно-гартований, електроіскровий та cold spray вносить специфічну механічну і термічну відповідь на охолодження та подальшу експлуатацію. Найвищі стискуючі напруження

(~ –380 … –420 МПа) формуються у внутрішньому мартенситному шарі внаслідок інтенсивного охолодження після лазерного нагріву. Електроіскровий прошарок з тугоплавкими включеннями проявляє високу пружну жорсткість, що створює локальні напруження розтягування біля межі фаз, особливо у разі відмінностей у коефіцієнтах теплового розширення.

Моделювання показало, що при зміні товщини верхнього cold spray-покриття від 0.1 до 0.3 мм залишкові напруження в підповерхневій зоні можуть змінюватись до 30–50 МПа, що критично при втомному навантаженні. Визначено, що гальванічна пара NiCrAlY-мартенсит створює різницю потенціалів до 0.35 В у морській воді, що активізує локальну корозію, особливо в місцях порушення адгезії між шарами. Розрахунок корозійного струму за відповідною моделлю показав, що при підвищеній електропровідності середовища (35 г/л NaCl) зони контакту між шарами можуть стати точками зародження піттингової корозії.

Отримані 3D-профілі напружень і полів потенціалів чітко виявляють критичні області на глибині 0.3–0.5 мм, де одночасно присутні високі стискуючі напруження та градієнти електрохімічного потенціалу. Це вказує на необхідність оптимізації товщини та послідовності зміцнення з урахуванням не лише механічних, а й корозійних ризиків. Запропонована модель дозволяє інженерно прогнозувати функціональну надійність деталей у морському середовищі з урахуванням складної міжфазної взаємодії.

Оцінка параметричної чутливості багатофазного покриття. Одним із ключових завдань при проектуванні багатофазного покриття для експлуатації в морському середовищі є визначення оптимального балансу між механічними та електрохімічними характеристиками шарів. Залишкові стискуючі напруження, сформовані після лазерного гартування, можуть підвищувати втомну міцність деталі, однак ці напруження значною мірою залежать від параметрів наступних технологічних стадій, зокрема товщини cold spray-покриття. Крім того, міжшарові електрохімічні градієнти здатні спричинити гальванічну корозію в точках контакту фаз з різними потенціалами. Для кількісної оцінки цих ефектів проведено серію розрахункових експериментів, результати яких подано нижче у вигляді узагальнених графіків.

Вплив товщини cold spray шару на залишкові напруження

На рис. 1 наведено залежність залишкових стискуючих напружень у мартенситному шарі від товщини зовнішнього cold spray-покриття. Видно, що збільшення товщини з 0.1 до 0.3 мм викликає поступове зменшення залишкових напружень з –380 до –350 МПа. Це пов'язано з демпфуючим ефектом холодного шару, який частково компенсує термоупругі деформації, викликані попереднім лазерним нагрівом.

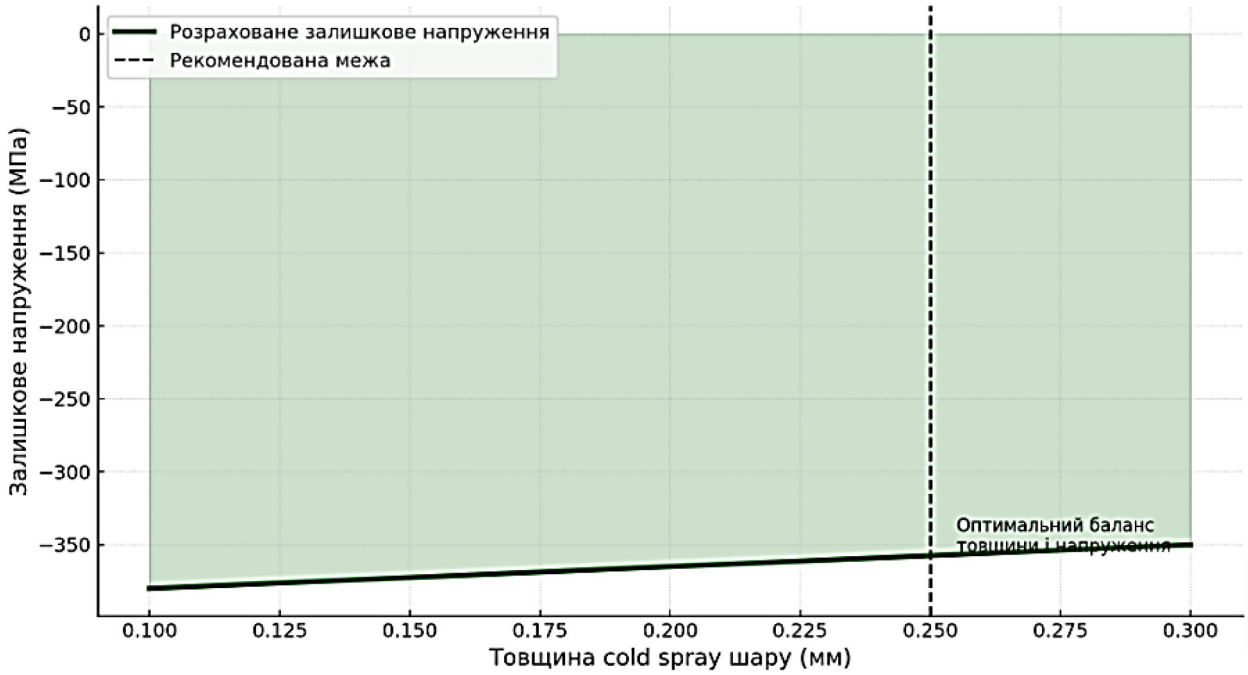

Рис. 1. Вплив товщини покриття на залишкові напруження у мартенситному підшарі

На графіку також виділено рекомендовану межу 0.25 мм, при якій досягається оптимальний компроміс між жорсткістю, антикорозійною стійкістю та допустимим рівнем стискуючих напружень. Товщина понад 0.27 мм призводить до надмірного зниження напружень і потенційного погіршення втомної міцності через втрату ефекту зміцнення.

Вплив міжфазної різниці потенціалів на гальванічний струм

На рис. 2 показано, як різниця потенціалів між матеріалами шарів впливає на гальванічний струм у системі багатофазного покриття. Із зростанням потенціалу понад 0.35 В спостерігається різке збільшення струму до значень, які перевищують 2 мА/см², це вважається порогом активного корозійного руйнування.

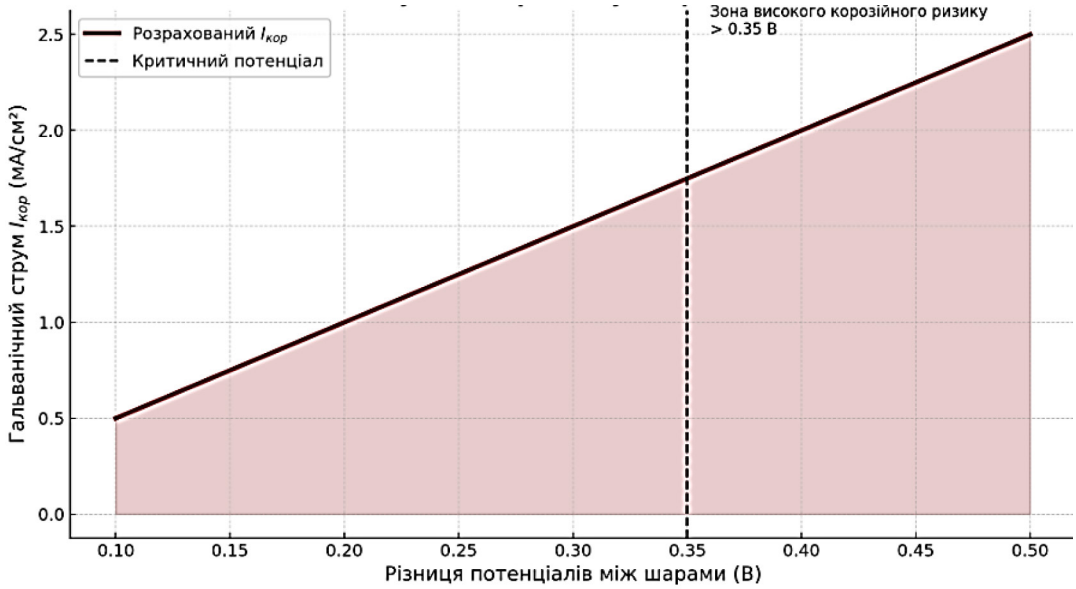

Рис. 2. Вплив різниці потенціалів на гальванічну активність у багатофазному покритті

Цей результат свідчить про те, що підбір матеріалів cold spray-шару повинен враховувати не лише механічну сумісність, а й електрохімічну нейтральність щодо основи. У разі використання високопотенціальних покриттів (NiCr, WC-Co), рекомендовано застосовувати перехідні буферні шари або бар'єрні анодні прошарки для запобігання локальній піттинговій корозії.

Проведене параметричне моделювання дозволило виявити критичні тенденції формування залишкових напружень і гальванічного струму в багатофазних структурах. Зокрема, встановлено, що збільшення товщини cold spray-покриття понад 0.25 мм призводить до значного зменшення стискуючих напружень у мартенситному шарі, що може послабити ефект зміцнення. Водночас, при перевищенні міжшарової різниці потенціалів 0.35 В, корозійна активність суттєво зростає, створюючи ризик локального руйнування. Таким чином, для забезпечення довговічності багатошарового зміцнення необхідно ретельно обирати не лише матеріали, а й геометричні параметри шарів, з урахуванням їхньої термомеханічної та електрохімічної взаємодії.

Висновки

У роботі здійснено комплексне моделювання багатофазного поверхневого зміцнення конструкційних сталей для умов експлуатації в агресивному морському середовищі. Розроблено математичну модель, що охоплює послідовне застосування лазерного гартування, електроіскрового легування та cold spray-покриттів з урахуванням термомеханічної та електрохімічної взаємодії між шарами. Особливу увагу приділено розподілу залишкових напружень у мартенситному підшарі, динаміці їх формування в залежності від режимів охолодження та геометричних характеристик верхнього шару. Було виявлено, що збільшення товщини cold spray-покриття викликає зменшення стискуючих напружень у підлеглому шарі, що позитивно впливає на стабільність структури, але може знижувати втомну міцність.

Паралельно проведено оцінку ризиків гальванічної корозії при контакті матеріалів з різними електродними потенціалами. Встановлено, що перевищення порогу в 0.35 В між шарами призводить до суттєвого зростання гальванічного струму, що може спричинити локальні пошкодження структури навіть при високій загальній твердості системи. Це підкреслює важливість оптимального підбору матеріалів з урахуванням не лише механічної сумісності, а й електрохімічної інертності.

Результати дослідження можуть бути використані для проектування зміцнених елементів корпусних конструкцій, підводного обладнання, турбін та рухомих вузлів морських машин, де поєднуються високі вимоги до зносостійкості, втомної міцності та корозійної стабільності. Запропонований підхід відкриває можливості для інтеграції багатофізичного моделювання у практику інженерного розрахунку технологій поверхневого зміцнення нового покоління.

Список використаної літератури

1. Глушкова Д. Б., Багров В. А., Волчук В. Дослідження впливу структури та фазового складу на зносостійкість економнолегованих метастабільних та вторинотвердіючих сталей // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2023. № 15. С. 50–58. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.50.954

2. Киричок П., Паліух Д. Дослідження впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин // Технологія і техніка друкарства. 2024. № 1(83). С. 4–17. DOI: 10.20535/2077-7264.1(83).2024.305494

3. Shypytsyn S., Fedorov H., Kirchu I., Lykhovey D., Stepanova T. Increasing the physical-mechanical and operational properties of high manganese steels by improving the technological processes of their melting, micro-alloying and modification // Casting Processes. 2024. № 155. С. 14–28. DOI: 10.15407/plit2024.01.014

4. Тріщук, Руслан. (2019). Алгоритм керування комплексним технологічним процесом зміцнення циліндричних сталевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. 15–28. 10.20535/2077-7264.2(64).2019.184574

5. Зусін А. Вплив режимів термічної обробки на структуру та зносостійкість наплавленого металу розробленими порошковими дротами з азотом // Наука та виробництво. 2024. С. 67–76. DOI: 10.31498/2522-9990272024303160

6. Чаудхурі Н., Юсофф Ш., Мустафа М., Лах Н. Дослідження впливу складу модифікованого лігніно-епоксидного покриття на корозійну стійкість з використанням методу поверхні відгуку // Journal of Chemistry and Technologies. 2024. Т. 31. С. 844–854. DOI: 10.15421/jchemtech.v31i4.290101

7. Мурашов А. П., Вігілінська Н. В., Грищенко О. М., Ющенко А. О., Горбань В. Ф. Investigation of the Mechanical Properties and Wear Resistance of Intermetallic FeAl-Based Plasma Sprayed Coatings // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 163. С. 91–96. DOI: 10.31649/1997-9266-2022-163-4-91-96

8. Савонов, Юрій & Капустян, Олексій & Парахнєвич, Євген & Єршов, Анатолій. (2024). Порівняльна оцінка електродних матеріалів для зварювання хромонікелевих сталей. Наука та виробництво. 64–70. 10.31498/2522-9990282024318363

9. G R, Raghav & Krishnan, D & Nagarajan, K. & Chandran, Vidya & Rajan, Suraj & Ramanujan, Sujith & Dhanesh, S & Anoop, M. (2022). Investigation of Mechanical, Wear, and Corrosion Properties of Al–BN–SiC–RHA Hybrid Composites Synthesized Through Powder Metallurgy Process. METALLOFIZIKA I NOVEISHIE TEKHNOLOGII. 44. 111–126. 10.15407/mfint.44.01.0111

10. Кругляк І. В., Середа Д. Б., Палехова І. В., Білозір І. В., Проломов А. А., Кіфорук Д. М., Стасевич О. О., Кривко Р. Г. Моделювання та оптимізація отримання покриттів, легованих хромом з використанням КПС // Математичне моделювання. 2022. № 2(47). С. 98–104. DOI: 10.31319/2519-8106.2(47)2022.268407

11. Погребова І., Янцевич К. Корозійна стійкість хромосиліцидних покриттів на сталі 45 у різних агресивних середовищах // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 2. С. 71–75. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2023.2.9

12. Мельник О. М., Булгаков М. П., Терновський В. Б., Заяць С. В. Моделювання термодинамічних і гідродинамічних факторів впливу на енергоефективність морських суден // Наука і техніка сьогодні. 2025. Т. 3, № 44. С. 1025–1035. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-1025-1035

13. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Maslii, O. M., & Maulevych, V. O. (2025). Technological approaches and practical solutions for surface hardening of structural steels. Наука і техніка сьогодні, 3(44), 893–906. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-892-906

14. Мельник О. М. Оцінка впливу енергоефективності на безпеку експлуатації судна // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. 2023. № 2(39). С. 76–81. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

15. Логінов О. В., Мельник О. М., Волошин А. О., Кучеренко В. Ю., Волошин Д. А., Варлан Т. Є. Аналіз викидів та стратегії оптимізації екологічних аспектів роботи судна // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35(74), № 5. С. 202–494. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/15

References

1. Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., & Volchuk, V. (2023). Investigation of the influence of structure and phase composition on the wear resistance of economically alloyed metastable and secondary-hardened steels. *Bulletin of the Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, (15), 50–58. https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.50.954

2. Kyrychok, P., & Paliukh, D. (2024). Investigation of the influence of profile geometry and micro-relief strengthening on the wear resistance of folding plates. *Printing Technology and Technique*, 1(83), 4–17. https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(83).2024.305494

3. Shypytsyn, S., Fedorov, H., Kirchu, I., Lykhovey, D., & Stepanova, T. (2024). Increasing the physical-mechanical and operational properties of high manganese steels by improving the technological processes of their melting, micro-alloying and modification. *Casting Processes*, (155), 14–28. https://doi.org/10.15407/plit2024.01.014

4. Trishchuk, R. (2019). Algorithm for controlling the complex technological process of strengthening cylindrical steel surfaces of printing equipment parts. *Printing Technology and Technique*, 15–28. https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(64).2019.184574

5. Zusin, A. (2024). Influence of heat treatment modes on the structure and wear resistance of overlay metal developed with nitrogen powder wires. *Science and Production*, 67–76. https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303160

6. Chaudhuri, N., Yusoff, S., Mustafa, M., & Lah, N. D. (2024). Study of the effect of modified lignin-epoxy coating composition on corrosion resistance using response surface methodology. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31, 844–854. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i4.290101

7. Murashov, A. P., Vigilinska, N. V., Hryshchenko, O. M., Yushchenko, A. O., & Horban, V. F. (2022). Investigation of the Mechanical Properties and Wear Resistance of Intermetallic FeAl-Based Plasma Sprayed Coatings. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 163, 91–96. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-163-4-91-96

8. Savonov, Y., Kapustian, O., Parakhnevych, Y., & Yershov, A. (2024). Comparative evaluation of electrode materials for welding chromium-nickel steels. *Science and Production*, 64–70. https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318363

9. Raghav, G. R., Krishnan, D., Nagarajan, K., Chandran, V., Rajan, S., Ramanujan, S., Dhanesh, S., & Anoop, M. (2022). Investigation of Mechanical, Wear, and Corrosion Properties of Al–BN–SiC–RHA Hybrid Composites Synthesized Through Powder Metallurgy Process. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 44, 111–126. https://doi.org/10.15407/mfint.44.01.0111

10. Kruhliak, I. V., Sereda, D. B., Palekhova, I. V., Bilozir, I. V., Prolomov, A. A., Kiforuk, D. M., Stasevych, O. O., & Kryvko, R. H. (2022). Modeling and optimization of obtaining chromium-alloyed coatings using CPS. *Mathematical Modeling*, 2(47), 98–104. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268407

11. Pohrebova, I., & Yantsevych, K. (2023). Corrosion resistance of chromium-silicide coatings on steel 45 in various aggressive environments. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 2, 71–75. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.9

12. Melnyk, O. M., Buhlakov, M. P., Ternovskyi, V. B., & Zaiats, S. V. (2025). Modeling of thermodynamic and hydrodynamic factors affecting the energy efficiency of marine vessels. *Science and Technology Today*, 3(44), 1025–1035. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-1025-1035

13. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Maslii, O. M., & Maulevych, V. O. (2025). Technological approaches and practical solutions for surface hardening of structural steels. *Science and Technology Today*, 3(44), 893–906. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-892-906

14. Melnyk, O. M. (2023). Assessment of the impact of energy efficiency on ship operation safety. *Podilskyi Bulletin: Agriculture, Technology, Economics*, 2(39), 76–81. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

15. Lohinov, O. V., Melnyk, O. M., Voloshyn, A. O., Kucherenko, V. Y., Voloshyn, D. A., & Varlan, T. Y. (2024). Analysis of emissions and strategies for optimizing the ecological aspects of ship operation. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 35(74)(5), 202–494. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/15