

10.31653/smf49.2024.27-40

Козицький С. В.

Національний університет “Одеська морська академія”

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНА ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННІ НАНОМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ КОРПУСУ СУДНА

Постановка проблеми в загальному вигляді

Корозія та обростання корпусу завдає великої економічної та екологічної шкоди, а прямі економічні втрати від них сягають 440 мільярдів доларів США щороку [1]. Обростання корпусу суден бактеріями, водоростями і тваринами знижує швидкість руху судна, погіршує його експлуатаційні та маневрені властивості, веде до руйнування конструкцій та зростання ризиків безпеки. Зі збільшенням рівня шорсткості поверхні корпусу збільшується опір руху суден. М'які обростаючі організми збільшують опір тертя корпусу на 10%; а жорсткі на 40%. Вплив брудного корпусу може становити близько 50% загального опору [2]. Це вплине на коефіцієнт корисної дії. Забезпечення необхідної швидкості руху судна зумовить збільшення вихідної потужності головного двигуна судна, що приведе до суттєвого збільшення витрати палива, а тому до додаткового забруднення доквілля.

Аналіз досліджень та публікацій

Особливі умови морського середовища вимагають в середньому раз на три роки очищення корпусу шляхом відправки судна в сухий док, що вимагає тривалого простою та інших додаткових витрат. Багато років проводилися дослідження по захисту корпусу судна від руйнувань (корозії, обростання, тощо). Покриття корпусу, такі як фарби проти корозії та обростання, позитивно вплинули на збільшення ресурсу судна [3].

Раніше для запобігання обростанню корпусу судна використовували сполуки олова та міді у фарбах. Їх використання заборонено з липня 2010 року (Регламент Комісії ЄС, 2010), оскільки приводило до забруднення доквілля отруйними хімічними сполуками, що входили до складу фарб.

Повністю відмовитись на суднах від протиобростаючих та корозійних покриттів не можливо. Актуальною задачею сьогодення є розробка більш екологічних та водостійких матеріалів, які би ефек-

тивно захищали корпус судна, запобігали його обростанню та спрощували очищення корпусу.

Протягом останнього десятиліття нанотехнології (технології, які досліджують поведінку матеріалів у діапазоні розмірів 1–100 нанометрів) викликали значний інтерес до застосування, у тому числі у морській галузі. Фізичні та хімічні властивості нанорозмірних частинок (НЧ) суттєво відрізняються від відповідних для традиційних матеріалів. Така відмінність у поведінці НЧ [4] зумовлені розмірними ефектами та особливостями їх квантово-механічної поведінки. Наноматеріали (НМ) характеризуються підвищеною твердістю в 2–7 разів [5], межею міцності в 1,5–8 разів, межею плинності в 2–3 рази у порівнянні з традиційними матеріалами [6]. Надлишкова поверхнева енергія НЧ [7] збільшує їх хімічну активність та коефіцієнт дифузії.

Постановка завдання. Серед проблем, що потребують вирішення у морському транспорті, зазначимо: збільшення ресурсу суднових енергетичних установок та корпусу, захист довкілля від викидів.

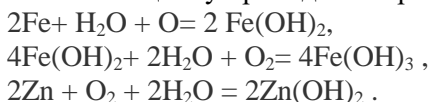
В статті наводяться дані по застосуванню нанотехнологій для створення перспективного покриття корпусу судна, яке запобігає хімічній та біологічній корозії, зменшує опір руху судна, тому зменшує витрати пального та забруднення довкілля.

Виклад основного матеріалу.

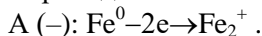
Захист корпусу судна від корозії

Інтенсивність корозії підводної зовнішньої поверхні судна визначається хімічним складом морської води, яка містить кисень, вуглекислий газ, сірководень та хлорид натрію. Концентрація домішок визначається температурою морської води тому змінюється з переходом судна з однієї кліматичної зони в іншу: тропічні умови є більш жорсткими у порівнянні з арктичними.

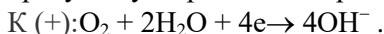
Хімічна корозія заліза та цинку проходить за реакціями [8]:



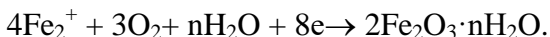
Крім хімічної корозії відбувається електрохімічна корозія. Ділянка поверхні металу, яка покрита водою, куди доступ кисню дуже обмежений, є анодом – там проходить окиснення



На периферії, куди кисень поступає без перешкод, проходить реакція відновлення за рахунок утворених електронів (катодна ділянка)



Від анода дифундують катіони Fe^{2+} , які беруть участь в утворенні іржі



Особливо сильно піддаються хімічній корозії металоконструкції, що знаходяться у воді – днище суден, підводні трубопроводи тощо.

Найпоширенішим методом захисту металів від корозії є фарбування, завдяки низькій вартості, простоті застосування, легкості реставрації та можливості сполучення з іншими методами захисту. Однак цей метод утворення полімеру безпосередньо на поверхні має свої недоліки: недостатню термостійкість і невисоку механічну міцність та короткий термін у межах від 12 до 24 місяців при повній схемі фарбування [9].

Сучасні вимоги до застосування систем покриттів для захисту від корозії різних суднових конструкцій, полягає у збільшенні ресурсу експлуатації шляхом запобігання їх руйнуванню [10]. Тому розробляють більш надійні та довговічні і екологічні та водостійкі матеріали. Для тривалого захисту судна від дії зовнішнього середовища необхідно, щоб плівка захисного покриття була суцільною, позбавленою пор, зберігала високу адгезію до поверхні, мала мінімальне водопоглинання [9, 10].

Завдяки нанотехнологіям можна отримати покриття, які захищають поверхню металів набагато краще, ніж ті методи захисту від корозії, що застосовувалися раніше. Такі лакофарбні матеріали (ЛФМ) передбачають невеликий вміст функціональних добавок в рецептурному складі, що містять нанофазу. Ці ЛФМ наносяться на поверхню корпусу судна у вигляді тонких плівок, які мають назву нанооболонки. Утворені нанооболонки не лише запобігають корозії, але мають наномасштабні структури поверхні, які знижують опір води, що зумовлює зниження енергоспоживання суден. На світліні зображено судно, яке для захисту корпусу використовує наноструктуровані фарби (рис. 1).

Завантаження НЧ SiO_2 (~20 нм) у фарбу збільшує її міцність, оскільки поверхневі атоми НЧ збільшують зчеплення між молекулами. НЧ кремнезему (близько 3-6% від полімеру) збільшують час проникнення води і кисню через покриття до поверхні металу. Присутність НЧ підвищує стійкість до подряпин і стирання покриття без зміни реології корпусу та збільшує у двічі час придатності покриття [11].



Рис.1. Антикорозійне нанопокриття корпусу судна [Електронний ресурс <https://nikerav.com.ua>]

Додавання 3% (по масі) НЧ TiO_2 (розміром 5-10 нм) до поліакрилового ґрунту покращує його антикорозійні властивості [12] та збільшує термін придатності покриття до 5 років.

Було розроблено покриття на основі вуглецевих нанотрубок (ВНТ) в якості антикорозійних суднових покриттів [13], шляхом завантаження ВНТ у фарбу. ВНТ мають високу міцність на розрив і модуль Юнга на порядок більший, ніж у сталі. Завантаження 0,7% (по масі) ВНТ у фарби показали значне покращення ударостійкості та збільшило міцність покриття на розрив [13].

Антикорозійні покриття з використання НЧ за рахунок нерівноважності НЧ [4] проявляють самоорганізацію – самостійно заліковують (ремонтують) мікротріщини на поверхні корпусу судна. Це значно поліпшує ефективність захисного шару [14].

Захист корпусу судна від біологічної корозії та обростання

Присутність у воді кисню, вуглекислого газу та сірководню є живильним середовищем для шкідливих мікроорганізмів. Мікроорганізми є важливою причиною корозії, яка зумовлену діяльністю бактерій та інших мікроорганізмів. Такий тип корозії називається «мікробною корозією». Інтенсивність обростання підводної зовнішньої поверхні судна визначається фітопланктоном і зоопланктоном та температурою води. Усі ці чинники змінюються з переходом судна з однієї кліматичної зони в іншу. Біологічне обростання суден бактеріями, водоростями і тваринами знижує швидкість руху

судна, погіршує експлуатаційні властивості, веде до руйнування конструкцій.

Для запобігання біокорозії та обростання застосовують біоциди – хімічні речовини, які знищують або знешкоджують виникаючі мікроорганізми. Найбільш ефективними та не токсичними для водних організмів визнані покриття фірми International Marine Coatings [15]. Однак ці лакофарбові покриття мають невеликий термін служби – до 24 місяців.

Завдяки нанотехнологіям можна отримати покриття, які захищають поверхню металів набагато краще. Нанокompозитні покриття просочують поверхні металу товщиною в кілька мікрон, стійкі до механічного зношування, хімічно стійкі та самоочишувані [14, 15].

Наприклад, лакофарбні матеріали (ЛФМ) і покриття, при додаванні наночасток срібла (~5–20 нм), мають унікальні антисептичні властивості [16]. Особливий розподіл атомів та електронів у НЧ та значна доля поверхневих атомів, які проявляють підвищену реакційну здатності у порівнянні з об'ємними, надають НЧ срібла особливі властивості на відміну від частинок срібла мікронних розмірів.

Механізм протиобрастаючих властивостей НЧ Ag заснований на здатності іонів Ag^+ закріплюватися (рис.2) на клітинних стінках [16].

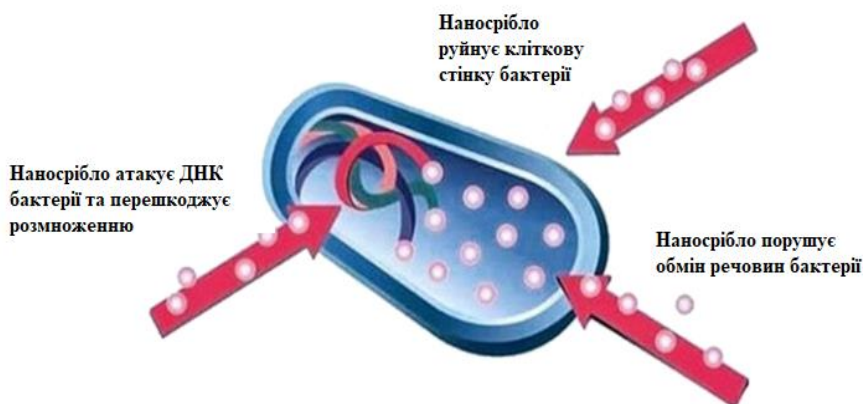


Рис. 2. Механізм впливу НЧ Ag на бактерії та його антибактеріальні властивості [16]

Іони Ag^+ проникають в бактеріальну клітину і взаємодіють з тіоловими групами більшості життєво важливих ферментів (рис. 2), що призводить до дезактивації ферменту, припиняє ріст бактерій і

зумовлює загибель бактеріальної клітини. Контактне знищення клітин іонами Ag^+ є основним механізмом запобігання обростання.

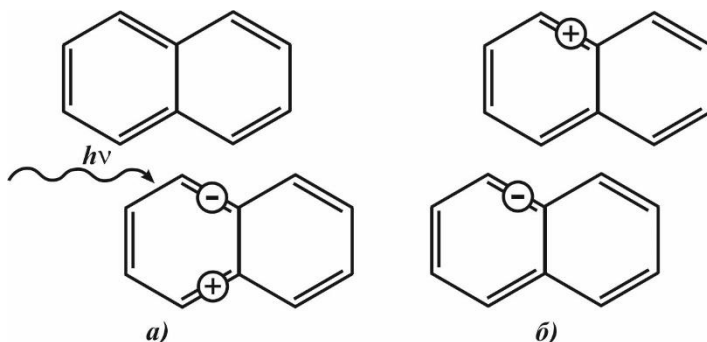


Рис. 3. Схема утворення АФК у напівпровідникових наноматеріалах [17]: а) генерація фотоном екситону Френкеля; б) розпад екситону та утворення активного аніону кисню

ЛФМ з наночастинками срібла екологічно безпечні для людей і довкілля, можуть застосовуватися для захисту металевих і неметалевих поверхонь.

Інший механізм [17, 18] проявляють НЧ оксиду металів, такі як ZnO та TiO_2 . Механізм запобігання обростання наноструктурованих оксидів металів заснований на утворенні під дією падаючого кванта світла іонів металів (рис.3) та активної форми кисню (АФК) (англійською ROS – reactive oxygen species)

Опромінення оксидів металів квантом світла призводить до перенесення електронів із валентної зони в зону провідності, утворюючи (рис.3, а) електронно-діркову пару (екситон Френкеля). Міграція електрона та дірки (рис. 3, б) приводить до утворення катіону металу (наприклад, Zn^+) та активного аніону кисню O^{2-} .

Утворення АФК приводить до різкого окислювального процесу, оскільки включають іони кисню з неспареними валентними електронами, які займають зовнішні електронні орбіталі, а тому проявляють надзвичайну активність. Після проникнення через оболонку АФК спричиняє пошкодження ДНК і РНК, окислення ліпідів, зміну білка, інгібування ферментів тощо (рис. 4).

Обсяг поглинання збільшується при зменшенні розміру частинок, тому НМ можуть легко проникати через клітинні мембрани та інші бар'єри живих організмів (рис. 4). Створені АФК впливають лише на ті організми, які безпосередньо контактують з ними.

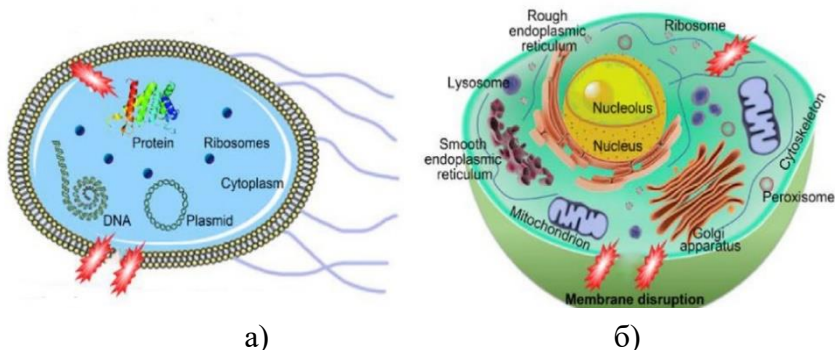
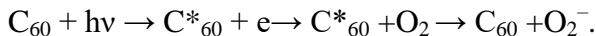


Рис. 4. Проникнення АФК через оболонку та її дія [17] на прокаріотичну клітину (А) та еукаріотичну клітину (В)

Ефективними для запобігання біокорозії виявилися вуглецеві наноматеріали. Досліджений механізм продукування АФК фулеренами C_{60} після фотозбудження [19]. Згідно з даним механізмом під дією світла генеруються електрони і збуджена молекула фулерена стає сильнішим акцептором електронів, що приводить до передачі електронів від фотозбудженої молекули C^*_{60} на молекулу O_2 та здійснюється за схемою



Утворена АФК після фотозбудження молекули C_{60} приводить до ушкодження структури ДНК. Крім того, завдяки гідрофобним властивостям молекула C_{60} може вбудовуватись у біологічні мембрани та локалізуватись у мембранних структурах [20].

Присутність фулерену C_{60} у фарбах ініціює продукування АФК на поверхнях захисної фулерено-полімерної плівки товщиною 100 нм [19]. Утворена плівка захищає від термічної та окисної деструкції, збільшує захисну здатність поверхні в 2–3 рази та час експлуатації в 3–8 разів, що може бути використано для знищення мікроорганізмів на підводній частині судна.

ВНТ виявляють хорошу антимікробну активність та впливають на обростання корпусу судна мікроорганізмами. Всього 0,5% вагового відсотка ВНТ впливає на склад біоплівки зменшуючи чисельність

бактерій та осідання мідій з твердим панциром, тому запобігає обростанню корпусу судна і збільшує міцність покриття на розрив [21].

Використання супергідрофобних матеріалів

Якщо молекула знаходиться на поверхні розділу між рідиною та газом, то вона буде взаємодіяти як з молекулами всередині рідини, так і з молекулами газу. При температурах далеких від критичної густина газу значно менша густини рідини, отже, рівнодійна сил, що діє на таку молекулу спрямована *перпендикулярно поверхні в рідину*. Тому поверхневі молекули мають надлишок енергії у порівнянні з молекулами, які знаходяться у внутрішніх шарах рідини [22]. Цей надлишок енергії dw називається *поверхневою енергією*, яка збільшується пропорційно величині утвореної площі dS

$$dw = -\sigma \cdot ds, \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, чисельна величина якого дорівнює силі F , що діє на одиничний відрізок контуру на поверхні рідини. Отже сила поверхневого натягу

$$F = \sigma \cdot l \quad (2)$$

пропорційна довжині l цього відрізка.

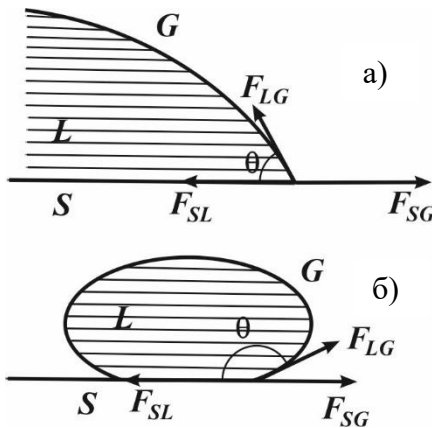


Рис. 5. Поверхні явища на межі рідини та твердого тіла:
а) випадок змочування рідиною,
б) випадок незмочування рідиною

Коефіцієнт поверхневого натягу залежить як від властивостей самої рідини, так і від властивостей тіла, яке межує з рідиною по даній поверхні. Таким середовищем може бути газ, інша рідина або тверде тіло. Поверхневий натяг властивий усім агрегатним станам.

Розглянемо (рис. 5) краплю рідини L (Liquid), яка лежить на поверхні твердого тіла S (Solid), а над ними знаходиться газ G (Gas). У кожній точці по периметру краплі на одиницю її довжини діють сили поверхневого натягу: F_{SL} , F_{SG} та F_{LG} . Кут θ , проведений з точки периметру краплі по дотичній до поверхні

краплі, називають *крайовим кутом змочування* (рис. 5).

Зауважимо, що по мірі зростання взаємодії з молекулами тіла, що оточують дану молекулу, у порівнянні з взаємодією зі “своїми” молекулами, зменшується рівнодійна сила, що діє на поверхневу молекулу, а тому зменшується коефіцієнт поверхневого натягу.

Сили поверхневого натягу F_{SL} та F_{LG} намагаються стягнути каплю, а сила F_{SG} – її розтягнути (рис. 5, а). Умова рівноваги каплі має вид [22]:

$$F_{SL} + F_{LG} \cos \theta = F_{SG} . \quad (3)$$

Звідки міра змочування визначається кутом θ

$$\cos \theta = (F_{SG} - F_{SL}) / F_{LG} . \quad (4)$$

При $F_{SG} > F_{SL}$ кут $\theta < \pi/2$, у цьому випадку поверхня твердого тіла S є *гідрофільною* і рідина L змочує тверде тіло S (рис. 5, б).

Коли $F_{SL} > F_{SG}$ кут $\theta > \pi/2$, у цьому випадку поверхня твердого тіла S є *гідрофобною*, і рідина L не змочує тверде тіло S (крапля відштовхується від поверхні). Поверхні, для яких значення кута змочування $\theta \sim 150^\circ - 170^\circ$ називаються *супергідрофобними*.

Для досягнення супергідрофобного стану необхідно істотно зменшити площі контакту рідини з поверхнею. Цього можна досягти шляхом використання наноматеріалів, як присадки до фарб, створюючи на поверхні шипи, розміром порядку мікрона. Тоді вода не розтікається, а «сідає» на шипи у вигляді кульок (рис. 6).

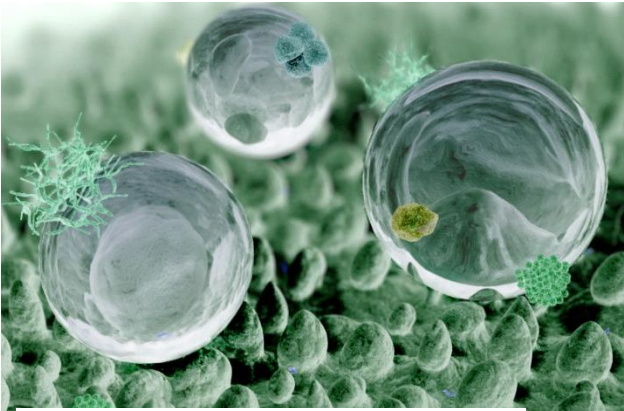


Рис. 6. Супергідрофобна поверхня

Істотне зниження площі контакту рідини з поверхнею дозволяє отримувати поверхні, для яких крайовий кут змочування може досягати значення 170° .

Однією з найбільш очікуваних властивостей супергідрофобних поверхонь є їхня здатність до самоочищення [23]. Структура супергідрофобної поверхні запобігає прилипанню краплі води тому при найменшому нахилі поверхні до горизонту ($\alpha < 5^\circ$) вода скочується з неї, захоплюючи при цьому частинки пилу і бруду, не залишаючи слідів від забруднень. Мінімізуючи накопичення бруду, супергідрофобні поверхні сприяють довговічності та ефективності матеріалів і конструкцій.

Крім водонепроникності супергідрофобні матеріали володіють рядом унікальних властивостей – стійкістю до корозії, стійкістю до органічного та неорганічного обростання підводної частини корпусу судна та полегшеному ковзанню рідкого потоку по поверхні.

Наведемо приклади застосування супергідрофобних матеріалів.

Тонкий шар оксиду алюмінію товщиною менше 100 нм, нанесений на поверхню металу чи скла, робить її супергідрофобною з крайовим кутом $\theta > 150^\circ$. Покрита поверхня НЧ Al_2O_3 , розміром 16 нм, набуває властивості самоочищення. Такий шар наноматеріалу має високу стійкість до тертя і придатний протягом 5 років [24]. Крім того, такий шар водонепроникний та стійкий до корозії і органічного та неорганічного обростання.

Супергідрофобні матеріали знаходять застосування для очищення підводної та надводної поверхні корпусу судна та скла на поверхні судна, які постійно піддаються дії води і різноманітного бруду. Ілюмінатори навігаційного містка стають каламутними і погіршують огляд, а покриті НЧ Al_2O_3 очищують поверхню від забруднення.

У випадку однорідного розподілу агрегованих у фарбу НЧ SiO_2 з діаметром 20 нм на поверхні утворювалася плівка з характерними масштабами шорсткості 40–80 нм [45]. Для гідрофобізації отриманої текстури на поверхню наносили полімерну плівку фторалкіл-ефірів. Так вдавалося досягти супергідрофобного стану підкладки з кутом натікання $\theta = 170^\circ$.

Шляхом розпилення або занурення поверхні у водний розчин НЧ TiO_2 (діоксиду титану розміром 16 нм) при нормальній температурі і після висихання природним чином протягом 10–20 хвилин на скляній та металічній поверхні утворюється нанорозмірна прозора

плівка на основі TiO_2 . Поверхня стає водонепроникною та гідрофобною з крайовим кутом $\theta > 150^\circ$ [25].

Фірма Nanoverge (США) створила фарбу [26], яка завдяки спеціальним наночастинкам у її складі володіє відразу двома корисними властивостями: стійкістю до подряпин та пошкоджень і здатністю до самоочищення від бруду, пилу та льоду (рис. 7). Продукт отримав назву Zyvere 2K Nanocoating і пройшов всі випробування в природних умовах. Покриття цим матеріалом краще чинить опір пошкодженням на 53% і забрудненню на 60%. При використанні даного покриття витрата палива у чистій воді знижується до 6%, а у воді з льодом – до 18%. Крім того збільшується корозійна стійкість [27]. Важливим є той факт, що нова фарба зберігає свої властивості протягом п'яти років.



Рис.7. Запобігання зледенінню корпусу судна

Покриття Nano-Clear® були розроблені у США, щоб значно продовжити термін служби пофарбованих активів на 10+ років [27]. Нанопокриття значно покращують корозійну стійкість, стійкість до подряпин і стирання, хімічну стійкість і довгострокову стійкість до ультрафіолету.

Висновки

Використання наноматеріалів для модернізації корпусу судна підвищує ефективності судна оскільки:

захищають від хімічної корозії – суттєво збільшують міцність покриття та зменшують проникнення води через покриття, тому збільшують термін придатності нанооболонки до 5–10 років;

захищають від біологічної корозії – під дією світла продукують у нанooksидах металів АФК, що сприяє ефективному знищенню одноклітинних та багатоклітинних організмів без забруднення довкілля.

Супергідрофобні наноструктуровані покриття мають чудову адгезію та особливі властивості поверхні: суттєво збільшують міцність покриття, запобігають обростанню та відштовхують воду від поверхні. Тому відкладення на підводній частині корпусу судна слабо зв'язані з його поверхнею і легко можуть бути очищені без сухого докування судна.

Є надія, що наукові розробки найближчим часом будуть широко впроваджені у морську галузь.

Перелік використаних джерел

1. Aghajani M., Esmaeili F. Anti-biofouling Assembly Strategies for Protein & Cell Repellent Surfaces: a Mini-Review. *J. Biomater. Sci. Polym. Edition*. 2021. Vol. 32. P. 1770–1789.
2. Xin Mao, Xin Cui and. Shuiping Chen Research Progress of Nanomaterials in the Prevention of Biological Fouling on Ships. *Journal of Physics: Conference Series. IOP*. 2002. 012013.
3. Маяков М.О. Шляхи вдосконалення захисту корпусу суден від корозії і морського обростання. *Молодий науковець: ДУІТ, Київ*. 2019. № 4. P. 33–37.
4. Kozyskyi S. V., Kiriian S. V. Properties and behavior of nanoparticles. *Фізика аеродисперсних систем*. 2022. №44. С. 17–30.
5. Козицький С. В., Кіріян С. В. Властивості наноструктурованих матеріалів. *Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник*. 2022. Вип. 45. С.124–135.
6. Козицький С. В. Застосування нанометеріалів для збільшення надійності та ресурсу судових установок. *Суднові енергетичні установки. Науково-технічний збірник*. 2024. Вип.48. С. 31–45.
7. Kozysky S.V., Kiriian S.V. Self-organization of nano-sized metal-containing lubricant additives. *Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник*. 2022. Вип.44. С.10–17.

8. Стоєв П.І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів. Харків: ХНУ ім. В. Н. Казаріна, 2020. 197 с.

9. Сапронов О.О., Букетов А.В., Лещенко О.В., Нигалатий В.Д. Антикоровізійні покриття на основі епоксидного зв'язувача для захисту устаткування морського та річкового транспорту. *Науковий вісник НЛТУ: збірник науково-технічних праць*. Львів: НЛТУУ. №26. 2016. С. 268–277.

10. Cui J. X., Zhang H. P., Zhang H., Shao Y. Y., Zhu J. X. Preparation and properties of powder coatings with long effect. *Coatings and Protection*. 2020. Vol. 41(01). P. 22–26.

11. Raghul K. S., Logesh M., Kisshore R. K., Ramanan P. M., Muralitharan G. Mechanical Behaviour of Sisal Palm Glass Fiber Reinforced Composite with Addition of Nano Silica. *Mater. Today Proc.* 2021. Vol. 37 (Part 2). P. 1427–1431.

12. Gaiotti M., Rizzo C. M. Recent Industrial Developments of Marine Composites Limit States and Design Approaches on Strength. *J. Mar. Sci. Appl.* 2020. Vol. 19(4). P. 553–566.

13. Dustebek J., Kandemir-Cavas C., Nitodas S. F., Cavas L. Effects of Carbon Nanotubes on the Mechanical Strength of Self-Polishing Paints. *Prog. Org. Coat.* 2016. Vol. 98. P. 18–27.

14. Francis A. P., Devasena T. Toxicity of Carbon Nanotubes: A Review. *Toxicol. Ind. Health* 2018. Vol. 34. P. 200–210.

15. Raghul K. S., Logesh M., Kisshore R. K., Ramanan P. M., Muralitharan G. Mechanical Behaviour of Sisal Palm Glass Fiber Reinforced Composite with Addition of Nano Silica. *Mater. Today Proc.* 2021. Vol. 37 (Part 2). P. 1427–1431.

16. Xin Mao, Xin Cui, Shuiping Chen. Research Progress of Nanomaterials in the Prevention of Biological Fouling on Ships. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 012013.

17. Kailasa S. K., Park T.-J., Rohit J. V., Koduru J. R. Antimicrobial Activity of Silver Nanoparticles. William Andrew Publishing, 2019. P. 461–484.

18. Youssef Z., Colombeau L., Yesmurzayeva N., et al. Dye-sensitized Nanoparticles for Heterogeneous Photocatalysis: Cases Studies with TiO₂, ZnO, Fullerene and Graphene for Water Purification. *Dyes Pigm.* 2018. Vol. 159. P. 49–71.

19. Summerscales J. Materials Selection for Marine Composites. In *Marine Composites: Design and Performance*. Pemberton Richard, John Summerscales. Elsevier, 2019. P. 3–30.

20. Матишевська О. П., Прилуцька С. В., Гринюк І. І. Фулерени C_{60} - біологічно активні молекули. 1. Фізико-хімічні властивості та біодоступність. *Біотехнологія*. т. 3, №1. 2010. С. 18–26.

21. Шур Д.Д., Матусіна З.З., Загінайченко С.Ю., Боцька Н.П. Єліна О. В. Фулерени: перспектива практичного застосування у медицині, біології та екології. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. т. 20, №1. 2012. С. 139–145

22. Козицький С. В., Золотко А. Н. Молекулярна фізика. Підручник. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

23. Білоусова А., Че Лі. Дослідження впливу наночастинок на гідрофобні властивості покриттів. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної WEB-конференції. Секція 1. Композиційні матеріали. Основи полімерів*. 2024.

24. Feng L., Li S., Li Y., Li H., Zhang L., Zhai J., Song Y., Liu B., Jiang L., Zhu D. Super-Hydrophobic surfaces: from natural to artificial. *Advanced Materials*. 2002. Vol. 14 (24). P. 1857–1860.

25. Su B., Tian Y., Jiang L. Bio inspired Interfaces with Superwettability. *From Materials to Chemistry. Journal of the American Chemical Society*. 2016. Vol. 138 (6). P. 1727–1748.

26. Електронний ресурс <http://soft99.com.ua/body-care/03144-soft99-nano-hard-clear>.

27. Корх М. В. Властивості та застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання / Суднові енергетичні установки. Науково-технічний збірник. Вип. 48, 2024. С. 54–62.