

УДК 656.622.620.3

DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.22-35

OVERVIEW OF THE APPLICATION OF SUPERHYDROPHOBIC NANOSTRUCTURED COATING TO INCREASE THE RESOURCE OF A SHIP'S HULL

ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРГІДРОФОБНОГО НАНОСТРУКТУРОВАНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ КОРПУСУ СУДНА

S. V. Kozytskyi , D.Sc., professor

С. В. Козицький, д.ф.-м.н., професор

National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The hull is a part of the vessel that is exposed to increased temperature and humidity changes during operation. One way to prevent the destruction of a ship's hull is to create a superhydrophobic state on its surface. Basic models, namely the Wenzel and Cassie–Baxter models, accounting for the contact angle of water on solid surfaces relating to the influence of surface roughness on hydrophobicity are discussed. High efficiency of coating roughness is achieved through the use of nanomaterials that ensure super hydrophobicity of the surface. Drops of water do not wet such a surface, so at the slightest inclination towards the horizon, water rolls off it, capturing dust and dirt particles, leaving no traces of pollution. This surface state leads to a decrease in the resistance of the vessel's movement; causes self-cleaning of portholes and the surface of the vessel from contamination; the possibility of cleaning the underwater part from fouling without dry dock; delays the formation of ice and in some cases fully prevents its formation.

Keywords: ship's hull, superhydrophobic state, anti-icing, de-icing, nanotechnology.

АНОТАЦІЯ

Корпус – це частина судна, яка під час експлуатації зазнає впливу підвищених коливань температури та вологості, що суттєво прискорює процеси його зношування та руйнування. Одним із сучасних і перспективних способів запобігання цим негативним явищам є формування на поверхні корпусу стану супергідрофобності. У роботі розглядаються класичні моделі Венцеля та Кассі-Бакстера, які враховують кут змочування води на твердих поверхнях та демонструють залежність цього параметра від мікро- і наношорсткості. Використання наноматеріалів у складі покриттів дозволяє значно підвищити їхню ефективність, забезпечуючи стабільний і довготривалий супергідрофобний стан. У таких умовах краплі води не змочують поверхню, а при найменшому нахилі скочуються з неї, захоплюючи частинки пилу та бруду й залишаючи поверхню чистою. Це явище сприяє зменшенню гідродинамічного опору під час руху судна, забезпечує самоочищення ілюмінаторів, спрощує очищення підводної частини корпусу від біологічного обростання без застосування сухого доку, а також затримує утворення криги та запобігає її накопиченню, що істотно підвищує безпеку й економічність експлуатації у складних кліматичних умовах.

Ключові слова: корпус судна, супер гідрофобний стан, анти-зледеніння, розморожування, нанотехнології.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Корпус судна є однією з найскладніших з погляду захисту ділянок судна, оскільки у процесі експлуатації він піддається посиленому впливу зміни вологості, температури, а його підводна частина обростання тваринними і рослинними організмами. Корозія і пошкодження корпусу та підвищення опору руху судна через обростання його підводної частини завдають великої економічної шкоди.

Проблема збереження корпусу судна у стані з мінімальним опором руху та дослідження по захисту корпусу судна від руйнувань проводяться постійно і завжди є актуальною задачею. Такі дослідження вимагають розробки та синтезу нових матеріалів, які забезпечать виконання зазначених задач.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Удосконалення технологій і пошук нових матеріалів з унікальними фізико-хімічними властивостями, зумовили дослідження властивостей матеріалів на молекулярному рівні. Матеріали, що містять структурні елементи, розміри яких хоча б в одному вимірі не перевищують 100 нм відносять до наноматеріалів (НМ), а область науки і техніки, яка досліджує властивості та застосування таких матеріалів, має назву нанотехнологія [1]. Малі розміри наночастинок (НЧ), приводять до великої долі поверхневих атомів (для сферичної частинки радіусом 10 нм, частка поверхневих атомів складає 30% [2]), які зумовлюють підвищену хімічну активність НЧ. НЧ проявляють суттєву нерівноважність, яка зумовлена як методами їх отримання [3] так і надлишковою поверхневою енергією. У діапазоні розмірів 1 - 100 нанометрів (10^{-9} - 10^{-7} м) виникає новий світ, в якому суттєво змінюються фізичні та хімічні властивості будь-яких речовин [1]. Для усіх НЧ спостерігається [4] зміна фундаментальних фізичних параметрів: підвищення твердості в 2...7 разів, збільшення міцності в 1,5...8 разів, межею плинності в 2...3 [5], істотне зниження температури плавлення. Пояснення особливостей поведінки НЧ та НМ можливо в рамках квантової механіки та нерівноважної термодинаміки [2].

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

У попередній роботі [6] показана ефективність використання НМ для захисту підводної частини корпусу судна від обростання. Покриття з НЧ Ag, ZnO, TiO₂, SnO₂, V₂O₅ та вуглецевими нанотрубками, запобігають прилипанню водоростей, осіданню мідій, зупиняють ріст бактерій. Крім того, покриття, до складу яких входять НЧ, мають кращу адгезію до корпусу і значно більшу міцність, ніж традиційні [7].

У даній роботі проведено огляд публікацій по ролі НЧ у створенні та особливих властивостей супер гідрофобного (СГ) стану поверхні з метою його застосування для очищення корпусу судна, зменшення опору руху судна і запобігання зледенінню та розморожуванню поверхні корпусу судна при руху у північних широтах.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Поверхневі явища

Розглянемо межу рідини та газу при термодинамічній рівновазі. Молекули поверхневого шару взаємодіють з молекулами рідини та з молекулами газу. При температурах далеких від критичної рівнодіюча сил для поверхневих молекул F спрямована перпендикулярно межі в

середину рідини. Отже поверхневі молекули мають надлишок енергії у порівнянні з молекулами, які містяться у внутрішніх шарах і цей надлишок енергії називається **поверхневою енергією** [8]. Збільшення поверхневого шару збільшує сумарну енергію молекул рідини і це збільшення пропорційне величині утвореної площі dS

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

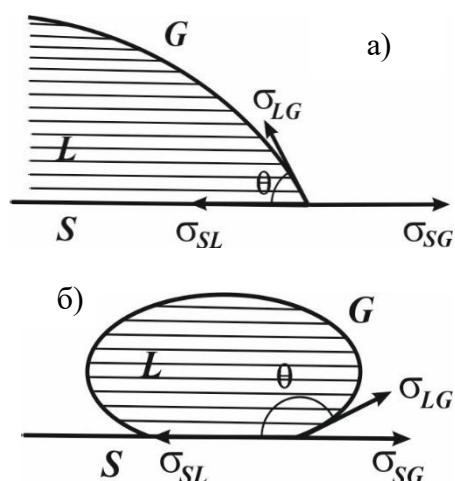
де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, який залежить як від властивостей самої рідини, так і від властивостей газу, який межує з рідиною по даній поверхні. При **зменшенні взаємодії** поверхневої молекули з зовнішніми молекулами зростає рівнодійна сила F , що діє на поверхневу молекулу, тобто **зростає коефіцієнт поверхневого натягу**.

Зауважимо, що розглянутий поверхневий натяг, що виникає на межі рідини та газу, має місце на межі дотику всіх агрегатних станів. Величина сили поверхневого натягу, що діє по лінії контакту на межі агрегатних станів визначається за формулою [8]

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

де l — довжина лінії контакту.

Розглянемо краплю рідини L (Liquid), яка знаходиться на поверхні твердого тіла S (Solid), а над ними знаходиться газ G (Gas) (рис. 1). У кожній точці периметра краплі на одиницю її довжини згідно рівняння (2), діють три сили поверхневого натягу (рис.1, а): σ_{SL} –



на границі тверде тіло – рідина, σ_{SG} – на границі тверде тіло – газ та σ_{LG} – на границі рідина – газ, θ – кут, який проведений з точки периметру краплі по дотичній до її поверхні, називають **крайовим кутом змочування**.

Сили поверхневого натягу σ_{SL} та σ_{LG} намагаються стягнути краплю, а сила σ_{SG} – її розтягнути (рис. 1.а). Умова рівноваги краплі має вид [8]:

$$\sigma_{SL} + \sigma_{LG} \cos \theta = \sigma_{SG}, \quad (3)$$

де θ – крайовий кут, який визначаємо з рівняння (3):

$$\cos \theta = (\sigma_{SG} - \sigma_{SL}) / \sigma_{LG}. \quad (3.1)$$

Рис.1. Поверхневі явища на межі рідини та твердого тіла: а) змочування; б) не змочування

Крайовий кут змочування є характеристикою ступеню фізичної взаємодії рідини з твердою поверхнею. В залежності від значень кута змочування поверхонь водою можливі два випадки.

При $\sigma_{SG} > \sigma_{SL}$ кут $\theta < \pi/2$, у цьому випадку поверхня твердого тіла S є **гідрофільною** і рідина L **змочує** тверде тіло S (рис. 1, а).

Коли $\sigma_{SL} > \sigma_{SG}$ кут $\theta > \pi/2$, у цьому випадку поверхня твердого тіла S є **гідрофобною**, і рідина L **не змочує** тверде тіло S , тоді крапля відштовхується від поверхні (рис.1, б). Поверхні, для яких значення кута змочування $\theta \sim 150^\circ - 170^\circ$ називаються СГ.

Аналіз формули (3.1) свідчить, що для досягнення великих значень крайового кута, тобто досягнення СГ стану, необхідно істотно збільшити σ_{SL} , тобто зменшити ефективну взаємодію між твердим тілом та рідною – **отримати низько енергетичну поверхню**.

2. Гідрофобні поверхні з високим кутом змочування та низьким кутом скочування



Рис.2. Зображення поверхні листка лотоса у растровому електронному мікроскопі, $X 1500$

Відомо, що поверхня листка лотоса завжди очищена від бруду («ефект лотоса»), а крайовий кут змочування поверхні складає більше 150° [9]. Проведені В. Бартлоттом дослідження поверхні листка лотоса показали, що поверхні листка має шорсткий рельєф у вигляді «шипів» з характерним розміром < 1 мкм (рис.2).

СГ спостерігається у інших рослин: кактус, капуста, очерет, водозбір, а також у комах – крила бабок і метеликів [9], що зумовлено їх шорсткою поверхнею розмірністю менше мікрона. Так створені природою шорсткі поверхні, які проявляють СГ властивості, вказали на шляхи пошуку методів отримання СГ поверхонь.

Для пояснення змочування шорсткої поверхні використовують просту модель чергування регулярних виступів [10]. Можливий механізм змочування коли крапля рідини контактує лише з малою частиною поверхні твердого тіла і не проникає у нерівності, які заповнені повітрям (рис. 3, а) – це модель змочування Кассі-Бакстера.

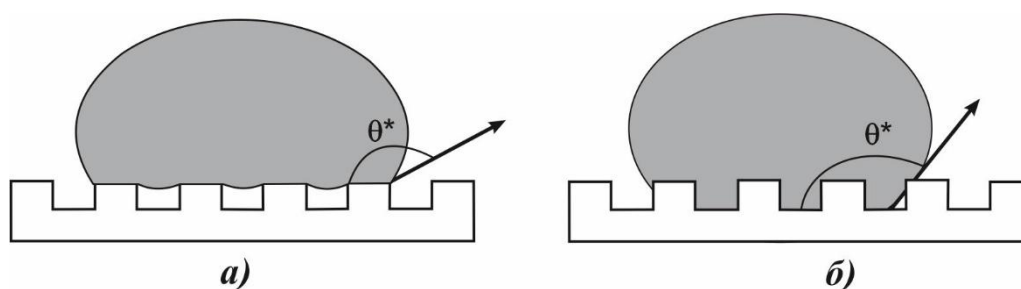


Рис. 3. Моделі змочування текстурованих поверхонь:
а – модель Кассі-Бакстера; б – модель Венцеля

Рівняння для розрахунку крайового кута змочування, яке описує цей випадок, має наступний вид [11]

$$\cos \theta^* = f_1 \cdot \cos \theta_1 + f_2 \cdot \cos \theta_2, \quad (4)$$

де θ^* – кут змочування структурованої поверхні рідиною, град.; θ_1 – кут змочування аналогічної плоскої поверхні рідиною, град.; θ_2 – кут змочування рідиною газоподібної фази, град.; f_1 і f_2 – частки площі взаємодії тверде тіло – рідина та газ – рідина відповідно.

Оскільки кут змочування газової фази рідиною $\theta_2 = 180^\circ$ та $f_2 = 1 - f_1$, з рівності (4) отримуємо рівняння для моделі Кассі-Бакстера:

$$\cos \theta^* = f_1 (1 + \cos \theta_1) - 1. \quad (5)$$

Можливий інший механізм змочування коли крапля рідини контактує з усією поверхнею структури (рис. 3, б) – це модель Венцеля [14]. Рівняння для розрахунку крайового кута змочування, яке описує цей випадок та виражається наступним рівнянням

$$\cos \theta^* = k \cdot \cos \theta_1, \quad (6)$$

де $k = S/S_{np}$, де S – площа поверхні структури; S_{np} – площа проекції структури.

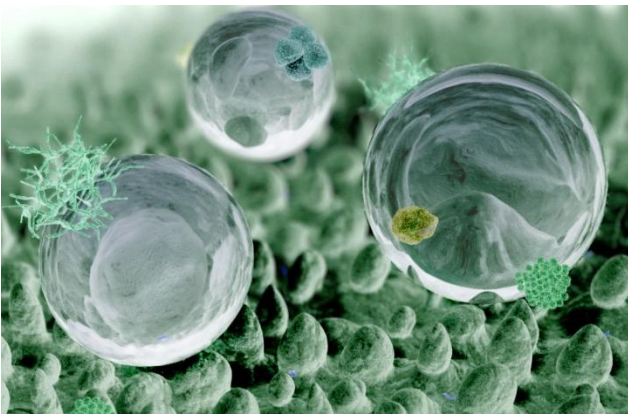


Рис. 4. Поверхня листка капусти

У дослідженнях [12] зазначено, що обидва рівняння (5) та (6) добре підходить для опису взаємодії рідина – тверде тіло у випадку, якщо розмір краплі суттєво перевищує розміри шорсткості поверхні (рис.4).

Для високого відштовхування води від поверхні не достатньо лише високого значення кута змочування. Необхідно, щоб при малих нахилах поверхні до горизонту крапля могла скочуватися з неї [13].

Для опису властивостей поверхні відштовхувати воду використовують значення гістерезису кута змочування H , який є різницею значень кута натікання $\theta_{нат}$ та кута відтікання $\theta_{від}$ рідини на похилій поверхні (рис.5)

$$H = \theta_{нат} - \theta_{від}. \quad (7)$$

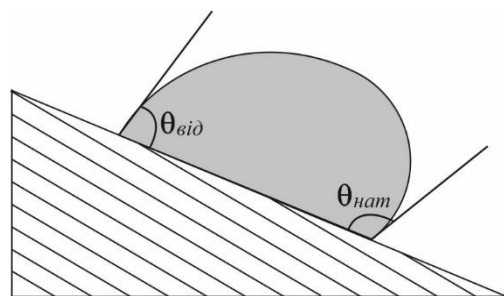


Рис. 5. Крайові кути натікання $\theta_{нат}$ та відтікання $\theta_{от}$

При великому значенні гістерезису кута змочування H крапля не може відірватися, навіть якщо кут змочування відповідає СГ стану поверхні.

Величина H залежить від шорсткості поверхні [13]. Спочатку при виникненні шорсткості поверхні під дією сил тяжіння та капілярного тиску Лапласа крапля може проникати в глиб текстури, змочуючи всю поверхню, тобто реалізується стан змочування Венцеля. Збільшення шорсткості приводить спочатку до зростання значення H за рахунок збільшення площі змочування поверхні. Але подальше, збільшення

шорсткості приводить до різкого зменшення значення H у 10–20 разів [13], яке зумовлене переходом до стану Кассі-Бакстера, коли крапля змочує лише частину поверхні, утвореної мікро-нано-розмірною шорсткістю.

Отже, для створення СГ поверхні з **низьким кутом скочування води** необхідно досягти стійкого енергетичного стану Кассі-Бакстера на ній. Досягнення такого стану залежить від шорсткості покриття поверхні; поверхневого натягу рідини, що змочує; поверхневої енергії матеріалу, що утворює підкладку; температури змочування, тощо.

3. Збільшення ефективності корпусу судна шляхом отримання СГ поверхні

СГ поверхня повинна мати мікро-нано-розмірну шорсткість та низьку поверхневу енергію. Поверхню з мікро-нано розмірною шорсткістю найпростіше створити шляхом застосування нанотехнології. НЧ Al_2O_3 з характерним розміром 16 нм наносилися плазмовою обробкою на поверхню металу чи скла. Тонкий шар оксиду алюмінію товщиною менше 100 нм робить поверхню СГ з крайовим кутом змочування $\theta > 150^\circ$ та кутом скочування $\alpha < 5^\circ$ [14]. Покрита поверхня, набуває властивості самоочищення, має високу стійкість до корозії та тертя і придатна протягом 5 років.

Реакцією гальванічного покриття сріблом поверхні міді з наступною пасивацією стеариновою кислотою отримано СГ стан [10]. Морфологію плівок срібла контролювали зміною концентрації нітрату срібла в розчині. За рахунок утворення на поверхні плівки срібла нано-мікро-розмірної шорсткості з характерним значення ~ 200 нм був досягнутий кут контакту з водою 156° .

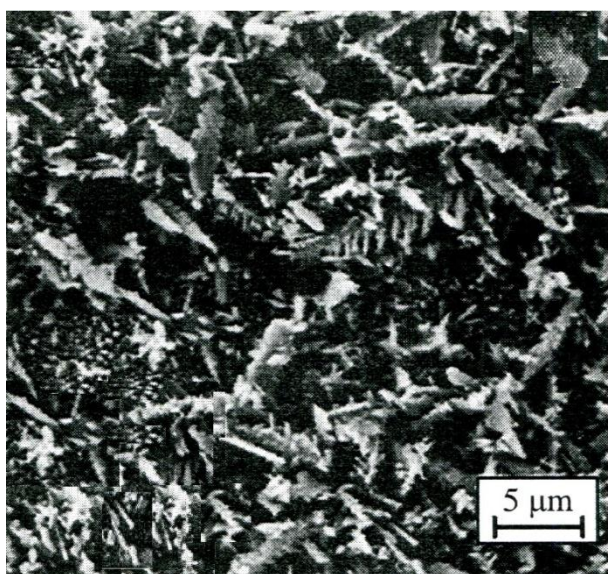


Рис. 6. Супергідрофобна поверхня утворена нанострижнями ZnO з поперечним розміром ~ 20 нм

За допомогою хімічного осадження на кремнієвих підкладках вирощували наноплівку з ZnO , яка утворена нанострижнями ZnO з характерним поперечним розміром ~ 20 нм. На рис. 6 показано зображення СГ поверхні у емісійному скануючому електронному мікроскопі [11]. Після пасивації утвореної наноплівки розчином стеаринової кислоти поверхня стає СГ з крайовим кутом змочування $\theta \sim 173^\circ$ та гістерезисом кутів змочування $H \sim 1,5^\circ$.

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 [14]. Для гідрофобізації на поверхню наносили плівку фторалкилефірів. Так досягли СГ стану підкладки з крайовим кутом змочування $\theta = 170^\circ$ та кутом скочування $\alpha < 5^\circ$.



Рис. 7. Самоочищення ілюмінаторів навігаційного містка судна

Шляхом розпилення НЧ TiO_2 (розміром 16 нм) на скляній та металічній поверхні утворюється нанорозмірна прозора плівка з крайовим кутом $\theta > 150^\circ$ [15]. СГ поверхні **здатні до самоочищення** (рис. 7). Зазвичай на склі або інших неорганічних матеріалах вода має контактний кут, що коливається від 30-40 градусів. На таких поверхнях легко формуються краплі, що погано ковзають, і в процесі висихання води на поверхні абсорбується і формується шар пилу. Наприклад, ілюмінатори навігаційного містка стають каламутними і погіршують огляд, а також забруднюється надводна поверхня корпусу судна.

Здатність СГ матеріалів до самоочищення [16] вирішує цю проблему оптимально. Покриті НЧ Al_2O_3 поверхні ілюмінаторів стають СГ і запобігають прилипанню краплі води. 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 (рис. 7). Уникнення розводів на склі ілюмінаторів навігаційного містка та відсутність необхідності їх періодичних очищень забезпечує надійне спостереження, підвищуючи навігаційну безпеку судноводіння.

Мінімізуючи накопичення бруду СГ поверхні сприяють довговічності та ефективності матеріалів і конструкцій, тому знаходять застосування для очищення як надводної, так і підводної поверхні корпусу судна та для захисту корпусу судна від корозії, забруднення і поліпшення гідродинамічних властивостей судна. На рис. 8 наведено фото порівняння стану надводної частини корпусу судна: зліва – частина поверхні корпусу, яка покрита НМ для забезпечення СГ поверхні; справа – частина поверхні корпусу, яка покрита традиційною фарбою.



Рис. 8. Демонстрація ефективної дії нанопокриття, яке створює СГ стан на поверхні корпусу судна

Нанотехнологія створює нанопокриття, які можуть самостійно заліковувати (ремонтувати) мікро тріщини, що значно поліпшує ефективність захисного шару корпусу судна від впливу навколишнього середовища [17]. Поверхні, покриті СГ матеріалом здатні відштовхувати не лише воду, але мастильні матеріали [18], що суттєво збільшують ресурс корпусу судна, спрощують очищення його поверхні від забруднення мастильними матеріалами, зменшують витрати на ремонт та заміну пошкоджених ділянок корпусу судна.

Використання СГ покриття забезпечує суттєве зменшення сил взаємодії між корпусом судна та обростаючими матеріалами. Так, сили адгезії до СГ поверхні на два порядки менші, ніж до оголеної поверхні [19], що зумовлюють можливість легкого очищення підводної частини корпусу судна без використання сухого доку. Підводне очищення корпусу судна, яке стоїть на рейді, здійснюється водолазами з використанням спеціального гідравлічного обладнання, наприклад системи Brush-Kart [20]. Система Brush-Kart із трьома головками дозволяє очищати до 1500-2000 м²/год. Конструкція щіток дозволяє працювати з різноманітними конструкціями корпусу судна, враховуючи гострі кути.

Підводне очищення СГ поверхонь можливо виконувати без людського ресурсу, а з використанням безпілотних дистанційно керованих підводних апаратів [21]. Вони можуть

працювати точніше та ефективніше, ніж людина, тому дають змогу істотно збільшити швидкість і підвищити якість та точність очищення корпусу судна, а також знизити витрати на відновлення підводної частини корпусу судна.

4. Застосування СГ покриття для боротьби з обледенінням

Обледеніння корпусу судна в умовах низьких температур та високої вологості полярних регіонів, становить серйозну загрозу для безпеки руху судна, приводить до значних економічних втрат та може пошкоджувати корпус судна. Для вирішення цієї проблеми в останні роки були запропоновані СГ покриття.

Для пояснення переваги застосування СГ матеріалів у порівнянні з традиційними способами боротьби з обледенінням розглянемо замерзання краплі води на твердій поверхні. Рівняння для вільної енергії Гіббса ΔG утворення зародків краплі води з кутом змочування θ має вид [22]

$$\Delta G = \frac{\pi r^2 \sigma_{LG}}{3} (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta), \quad (8)$$

де r – критичний радіус. Таким чином, чим більше значення кута θ (коли $\theta > 90^\circ$), тим більше значення ΔG і, отже, тим більший енергетичний бар'єр і краща ефективність захисту від зледеніння.

Напишемо закон збереження енергії для процесу замерзання краплі води на поверхні

$$W + mL + m\lambda = (q_k + q_r + Q) \cdot t, \quad (9)$$

де W – кінетична енергія краплі, що ударяється з поверхню, m – маса краплі, L – питома теплота пароутворення, λ – питома теплота плавлення льоду, q_k – конвективний теплообмін між контактною поверхнею краплі та навколишнім середовищем, q_r – радіаційний теплообмін між поверхнею краплі та навколишнім середовищем, Q – теплообмін між краплею та поверхнею, t – час замерзання краплі.

Тепло, що виділяється водою в процесі замерзання [22]

$$Q = (T_w - T_a) / R, \quad (10)$$

де T_w та T_a – температури краплі під час замерзання та навколишнього середовища, R – тепловий опір між краплею та поверхнею, який розраховуємо за формулою [23]

$$R = \frac{hX}{2S\lambda_i} + \frac{h(1 - X_i)}{2S\lambda_s}, \quad (11)$$

де λ_i та λ_s – теплопровідності льоду та поверхні, X_i – фактор впливу теплопровідності льоду, h – коефіцієнт тепловіддачі між краплею води та поверхнею, S – площа контакту краплі води з поверхнею.

Час теплообміну між краплею води та поверхнею від початку фазового переходу краплі води до повного формування краплі твердого льоду описується формулою [22]

$$t = \frac{\rho LV}{S\kappa(T_m - T_s)}, \quad (12)$$

де ρ – густина води, V – об'єм краплі води, κ – коефіцієнт тепловіддачі, T_m – рівноважна температура замерзання, T_s – температура поверхні.

Аналіз формул (11) та (12) вказують на два фактори, які пояснюють перевагу СГ матеріалів у порівнянні з традиційними:

- чим менша теплопровідність λ_s поверхні, тим більший тепловий опір R між краплею та поверхнею;

- чим менша площа S зіткнення краплі з поверхнею, тим більший час t замерзання краплі.

Краплі води мають тенденцію переходити зі стану Кассі-Бакстера в стан Венцеля на СГ поверхнях при низькій температурі навколишнього середовища та високій відносній вологості [24], що призводить до більшого значення площі зіткнення краплі з поверхнею S . Таким чином, існування стабільного стану Кассі-Бакстера в таких середовищах є важливим фактором для ефективного захисту від обледеніння [24], оскільки вони можуть ефективно затримувати утворення льоду та зменшувати міцність адгезії льоду (рис. 9).



Рис.9. Супергідрофобне нанопокриття, яке запобігає зледенінню

У роботі [19] досліджено вплив мікроструктури СГ поверхонь на міцність зчеплення льоду при робочій температурі – 6°C. Порівняно з оголеною алюмінієвою поверхнею, мікроструктура СГ алюмінієвих поверхонь (крайовий кут змочування більше 150° і кути ковзання води менше 8,2° навіть при робочій температурі – 6°C) зменшила міцність зчеплення з льодом в 164 рази. Низькі значення міцності адгезії до льоду зразків пояснюються СГ властивостями поверхні, які були отримані шляхом створення мікро-нано-розмірної структури на поверхні алюмінію після обробки фторалкілсиланом.

У роботі [25] розробили міцну плівку перфтородецильованої графенової нанострічки (FDO-GNR). Плівки FDO-GNR крім високої міцності запобігає замерзання води, що надходить до поверхні при температурі –14°C.

Другою проблемою плавання у північних районах є боротьба з наслідками обледеніння, коли на СГ покриттях з'являється обмерзання. Автори [22, 26-28] розробили фото термічні СГ покриття, які були створені шляхом впровадження ВНТ [26], графену [27] або нанострижнів атапульгіту [28] у СГ покриття. ВНТ, графен та нанострижні атапульгіту мають коефіцієнт теплопровідності на порядки більший, ніж у алмазу. Тепло, що попадає на поверхню від

падаючого світла, ефективно поширюється по покриттю, а за рахунок СГ покриття не передається поверхні корпусу. Так досягається перетворення сонячної енергії в тепло у нанопокритті, що відтермінує або запобігає обмерзанню та сприяє розморожуванню поверхні, якщо відбулося її обледеніння (рис.9).

СГ покриття із крайовим кутом до 162° та кутом скочування лише $4,2^\circ$, виготовлене [27] на основі НЧ SiO_2 , TiO_2 впроваджених у полімер. Сили адгезії мікро крапель до створеного покриття становить $\sim 16,8 \pm 0,6$ мкН [27]. Крім того, завдяки чудовим водовідштовхувальним властивостям і фото тепловому ефекту покриття продемонструвало ефективні властивості пасивного захисту від зледеніння та ефективного фото термічного захисту від обмерзання.

Фото термічний шар оксиду міді (CuO) був виготовлений [28] за допомогою методів хімічного осадження та травлення. Потім шар просочували стеариною кислотою для створення гідрофобної фото термічної поверхні. Отримана СГ поверхня з крайовим кутом $154,1^\circ$ і кутом ковзання $6,8^\circ$ забезпечує хороші властивості проти зледеніння та розморожування. Отримані результати показують, що під впливом імітованого світлового опромінення за рахунок поширення тепла по нанострижням атапульгіту температура поверхні покриття підвищується до 80°C протягом 12 хвилин, а при температурі -15°C лід на поверхні повністю тоне.

Розроблені [22] міцні фото термічні СГ покриттів із трирівневими мікро-нано-нано-структурами шляхом осадження нанорозмірних металоорганічних структур на природних нанострижнях атапульгіту. Покриття демонструє високу СГ і стабільні стани Кассі-Бакстера. Завдяки нанорозмірним металоорганічним структурам покриття має хорошу механічну міцність і довговічність та відмінний фото термічний ефект від обмерзання та активного розморожування в реальних середовищах. У поєднанні з низькою теплопровідністю, покриття виявляють [22] чудові характеристики проти обледеніння – відсутність замерзання протягом принаймні 150 хвилин при температурі -5°C і швидке розморожування за 12,7 хвилин у реальному світі за рахунок ефективного використання природного сонячного світла в таких середовищах.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. Створення стійкого стану Кассі-Венцеля є необхідною умовою існування СГ стану поверхні, що досягається застосування НМ, які здатні утворювати мікро-нано-розмірну шорсткість поверхні.

2. СГ стан поверхні завдяки зменшенню площі контакту рідини з поверхнею та завдяки високому куту змочування і низькому куту ковзання приводить до:

- зменшення сили опору руху судна, а тому економію палива та зменшення забруднення довкілля;
- самоочищення ілюмінаторів та надводної поверхні судна;
- можливості очищення та відновлювати підводної частини корпусу від обростання без використання сухого доку за допомогою безпілотних підводних апаратів;
- затримування утворення льоду, а також можливість запобігання його існування на поверхні шляхом створення фото термічного ефекту у мікро-нано-розмірному покритті.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Ph. Kumar, *Principles of Nanotechnology*, 2nd ed. Scitech Publications, 2020, 115 p.
- [2] S. V. Kozitskyi and S. V. Kiriian, "Properties and behavior of nanoparticles," *Фізика аеродисперсних систем*, no. 60, pp. 15–26, 2022, doi:10.18524/0367-1631.2022.60.265983.

- [3] С. В. Козицький, “Мікро- та нанорозмірні кристали сульфідів цинку, отримані методом високотемпературного синтезу, що самопоширюється,” *Фізика аеродисперсних систем*, no. 61, pp. 32–42, 2023, doi:10.18524/0367-1631.2023.61.290948.
- [4] С. В. Козицький and С. В. Кіріян, “Властивості наноструктурованих матеріалів,” *Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник*, vol. 45, pp. 124–135, 2022, doi:10.31653/smf45.2022.123-133.
- [5] С. В. Козицький, “Застосування наноматеріалів для збільшення надійності та ресурсу суднових установок,” *Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник*, vol. 48, pp. 31–45, 2024, doi:10.31653/smf48.2024.31-45.
- [6] С. В. Козицький, “Застосування наноматеріалів для запобігання біологічному обростанню та корозії корпусу судна,” *Судноводіння. Збірник наукових праць НУ “ОМА”*, no. 36, pp. 64–76, 2024, doi:10.31653/2306-5761.36.2024.64-76.
- [7] X. Mao, X. Cui, and S. Chen, “Research progress of nanomaterial in the prevention of biological fouling on ships,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2002, Art. no. 012013, 2021, doi:10.1088/1742-6596/2002/1/012013.
- [8] С. В. Козицький and А. Н. Золотко, *Молекулярна фізика. Підручник*. Одеса: Астропринт, 2011, 352 с.
- [9] Y. Zheng, X. Gao, and L. Jiang, “Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings,” *Soft Matter*, vol. 3, pp. 178–182, 2007, doi:10.1039/b612667g.
- [10] A. Safaei, D. K. Sarkar, and M. Farzaneh, “Superhydrophobic properties of silver-coated films on copper surface by galvanic exchange reaction,” *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 8, pp. 2493–2498, 2008, doi:10.1016/j.apsusc.2007.09.073.
- [11] D. K. Sarkar and M. Farzaneh, “Superhydrophobic coatings with reduced ice adhesion,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, no. 9, pp. 1215–1237, 2009, doi:10.1163/156856109X433964.
- [12] N. Li *et al.*, “Micro/nano-cactus structured aluminium with superhydrophobicity and plasmon-enhanced photothermal trap for icephobicity,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 429, Art. no. 132183, 2022, doi:10.1016/j.cej.2021.132183.
- [13] A. Lafuma and D. Quere, “Superhydrophobic states,” *Nature Materials*, vol. 2, no. 7, pp. 457–460, 2003, doi:10.1038/nmat924.
- [14] L. Feng, S. Li, Y. Li, *et al.*, “Superhydrophobic surfaces: From natural to artificial,” *Advanced Materials*, vol. 14, no. 24, pp. 1857–1860, 2002, doi:10.1002/adma.200290020.
- [15] Z. Youssef, L. Colombeau, N. Yesmurzayeva, F. Baros, R. Vanderesse, T. Hamieh, *et al.*, “Dye-sensitized nanoparticles for heterogeneous photocatalysis: Case studies with TiO₂, ZnO, fullerene and graphene for water purification,” *Dyes and Pigments*, vol. 159, pp. 49–71, 2018, doi:10.1016/j.dyepig.2018.06.002.
- [16] S. A. Higazy, M. S. Selim, A. M. Azzam, and S. A. El-Safty, “Hierarchical biocide-free silicone/graphene–silicon carbide nanocomposite coatings for marine antifouling and superhydrophobicity of ship hulls,” *Chemical Engineering Science*, vol. 291, Art. no. 119929, 2024, doi:10.1016/j.ces.2024.119929.
- [17] С. В. Козицький, “Підвищення ефективності судна шляхом використання наноматеріалів для модернізації корпусу судна,” *Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник*, vol. 49, pp. 131–143, 2024, doi:10.31653/smf340.2024.131-143.

- [18] J. Li, E. Ueda, D. Paulssen, and P. A. Levkin, “Slippery lubricant-infused surfaces: Properties and emerging applications,” *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 4, Art. no. 1802317, 2019, doi:10.1002/adfm.201802317.
- [19] F. Wang *et al.*, “Ice adhesion on different microstructure superhydrophobic aluminum surfaces,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 58–67, 2012, doi:10.1080/01694243.2012.701506.
- [20] Brush-Kart, “Official website,” [Online]. Available: <https://www.brush-kart.com/eng>. [Accessed: Sep. 10, 2025].
- [21] Demetra-5, “Catalog,” [Online]. Available: <http://www.demetra5.kiev.ua/ua/catalog/seacy>. [Accessed: Sep. 10, 2025].
- [22] M. Mao *et al.*, “Scalable robust photothermal superhydrophobic coatings for efficient anti-icing and de-icing in simulated/real environments,” *Nature Communications*, vol. 15, Art. no. 9610, 2024, doi:10.1038/s41467-024-54058-8.
- [23] S. Chang, H. Qi, S. Zhou, and Y. Yang, “Experimental and numerical study on freezing process of water droplets under surfaces with different wettability,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 219, Part B, Art. no. 119516, 2023, doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.119516.
- [24] Y. Li *et al.*, “Solar deicing nanocoatings adaptive to overhead powerlines,” *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 25, Art. no. 2113297, 2022, doi:10.1002/adfm.202113297.
- [25] T. Wang, Y. Zheng, A.-R. O. Raji, Y. Li, W. K. A. Sikkema, and J. M. Tour, “Passive anti-icing and active deicing films,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 8, no. 22, pp. 14169–14173, 2016, doi:10.1021/acsami.6b03060.
- [26] Y. Liu *et al.*, “Robust photothermal coating strategy for efficient ice removal,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 41, pp. 46981–46990, 2020, doi:10.1021/acsami.0c13367.
- [27] D. Li, L. Ma, B. Zhang, and S. Chen, “Facile fabrication of robust and photo-thermal superhydrophobic coating with efficient ice removal and long-term corrosion protection,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 450, Part 4, Art. no. 138429, 2022, doi:10.1016/j.cej.2022.138429.
- [28] J. Wei, S. Yang, X. Xiao, and J. Wang, “Hydrophobic solid photothermal slippery surfaces with rapid self-repairing, dual anti-icing/deicing, and excellent stability based on paraffin and etching,” *Langmuir*, vol. 40, no. 14, pp. 7747–7759, 2024, doi:10.1021/acs.langmuir.4c00440.

REFERENCES

- [1] Ph. Kumar, *Principles of Nanotechnology*, 2nd ed. Scitech Publications, 2020, 115 p.
- [2] S. V. Kozytskyi and S. V. Kiriian, “Properties and behavior of nanoparticles,” *Fizyka aerodispersnyh system*, no. 60, pp. 17–30, 2022, doi:10.18524/0367-1631.2022.60.265983.
- [3] S. V. Kozytskyi, “Mikro- ta nanorozmirni krystaly sulfidy tynku otrymani metodom vysokotemperaturnogo syntezu shcho samoposhuruetsia,” *Fizyka aerodispersnyh system*, no. 61, pp. 32–42, 2023, doi:10.18524/0367-1631.2023.61.290948.
- [4] S. V. Kozytskyi and S. V. Kiriian, “Vlastyvoli nanostrukturovanykh materialiv,” *Sudnovi energetychni ustanovky. Naukovo-technichniy zbirnyk*, vol. 45, pp. 124–135, 2022, doi:10.31653/smf45.2022.123-135.
- [5] S. V. Kozytskyi, “Zastosuvannia nanomaterialiv dlia zbilshennia nadiinosti ta resursu sudnovykh ustanovok,” *Sudnovi energetychni ustanovky. Naukovo-technichniy zbirnyk*, vol. 48, pp. 31–45, 2024, doi:10.31653/smf48.2024.31-45.

- [6] S. V. Kozytskyi, “Zastosuvannia nanomaterialiv dlia zapobigannia biologichnomu obrostanniy ta korozii korpusy sudna,” *Sudnovodinnia. Zbirnyk naukovykh prats. NU “OMA”*, no. 36, pp. 64–76, 2024, doi:10.31653/2306-5761.36.2024.64-76.
- [7] X. Mao, X. Cui, and S. Chen, “Research progress of nanomaterial the prevention of biological fouling on ships,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2002, Art. no. 012013, 2021, doi:10.1088/1742-6596/2002/1/012013.
- [8] S. V. Kozytskyi and A. N. Zolotko, *Moleculiapna fizyca. Pidruchnyc*. Odesa: Astroprynt, 2011, 352 p.
- [9] Y. Zheng, X. Gao, and L. Jiang, “Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings,” *Soft Matter*, vol. 3, pp. 178–182, 2007, doi:10.1039/b612667g.
- [10] A. Safaei, D. K. Sarkar, and M. Farzaneh, “Superhydrophobic properties of silver-coated films on copper surface by galvanic exchange reaction,” *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 8, pp. 2493–2498, 2008, doi:10.1016/j.apsusc.2007.09.073.
- [11] D. K. Sarkar and M. Farzaneh, “Superhydrophobic coatings with reduced ice adhesion,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, no. 9, pp. 1215–1237, 2009, doi:10.1163/156856109X433964.
- [12] N. Li *et al.*, “Micro/nano-cactus structured aluminium with superhydrophobicity and plasmon-enhanced photothermal trap for icephobicity,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 429, Art. no. 132183, 2022, doi:10.1016/j.cej.2021.132183.
- [13] A. Lafuma and D. Quere, “Superhydrophobic states,” *Nature Materials*, vol. 2, no. 7, pp. 457–460, 2003, doi:10.1038/nmat924.
- [14] L. Feng, S. Li, Y. Li, *et al.*, “Superhydrophobic surfaces: From natural to artificial,” *Advanced Materials*, vol. 14, no. 24, pp. 1857–1860, 2002, doi:10.1002/adma.200290020.
- [15] Z. Youssef *et al.*, “Dye-sensitized nanoparticles for heterogeneous photocatalysis: Case studies with TiO₂, ZnO, fullerene and graphene for water purification,” *Dyes and Pigments*, vol. 159, pp. 49–71, 2018, doi:10.1016/j.dyepig.2018.06.002.
- [16] S. A. Higazy, M. S. Selim, A. M. Azzam, and S. A. El-Safty, “Hierarchical biocide-free silicone/graphene-silicon carbide nanocomposite coatings for marine antifouling and superhydrophobicity of ship hulls,” *Chemical Engineering Science*, vol. 291, Art. no. 119929, 2024, doi:10.1016/j.ces.2024.119929.
- [17] S. V. Kozytskyi, “Pidvyshchennia efektyvnosti sudna chliahom vykorystannia nanomaterialiv dlia modernizatsii korpusu sudna,” *Sudnovi energetychni ustanovky. Naukovo-technichni zbirnyk*, vol. 49, pp. 131–143, 2024, doi:10.31653/smf340.2024.131-143.
- [18] J. Li, E. Ueda, D. Paulssen, and P. A. Levkin, “Slippery lubricant-infused surfaces: Properties and emerging applications,” *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 4, Art. no. 1802317, 2019, doi:10.1002/adfm.201802317.
- [19] F. Wang *et al.*, “Ice adhesion on different microstructure superhydrophobic aluminum surfaces,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 58–67, 2012, doi:10.1080/01694243.2012.701506.
- [20] Brush-Kart, “Official website,” [Online]. Available: <https://www.brush-kart.com/eng>. [Accessed: Sep. 10, 2025].
- [21] Demetra-5, “Catalog,” [Online]. Available: <http://www.demetra5.kiev.ua/ua/catalog/seaey>. [Accessed: Sep. 10, 2025].

- [22] M. Mao *et al.*, “Scalable robust photothermal superhydrophobic coatings for efficient anti-icing and de-icing in simulated/real environments,” *Nature Communications*, vol. 15, Art. no. 9610, 2024, doi:10.1038/s41467-024-54058-8.
- [23] S. Chang, H. Qi, S. Zhou, and Y. Yang, “Experimental and numerical study on freezing process of water droplets under surfaces with different wettability,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 219, Part B, Art. no. 119516, 2023, doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.119516.
- [24] Y. Li *et al.*, “Solar deicing nanocoatings adaptive to overhead powerlines,” *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 25, Art. no. 2113297, 2022, doi:10.1002/adfm.202113297.
- [25] T. Wang, Y. Zheng, A.-R. O. Raji, Y. Li, W. K. A. Sikkema, and J. M. Tour, “Passive anti-icing and active deicing films,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 8, no. 22, pp. 14169–14173, 2016, doi:10.1021/acsami.6b03060.
- [26] Y. Liu *et al.*, “Robust photothermal coating strategy for efficient ice removal,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 41, pp. 46981–46990, 2020, doi:10.1021/acsami.0c13367.
- [27] D. Li, L. Ma, B. Zhang, and S. Chen, “Facile fabrication of robust and photo-thermal superhydrophobic coating with efficient ice removal and long-term corrosion protection,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 450, Part 4, Art. no. 138429, 2022, doi:10.1016/j.cej.2022.138429.
- [28] J. Wei, S. Yang, X. Xiao, and J. Wang, “Hydrophobic solid photothermal slippery surfaces with rapid self-repairing, dual anti-icing/deicing, and excellent stability based on paraffin and etching,” *Langmuir*, vol. 40, no. 14, pp. 7747–7759, 2024, doi:10.1021/acs.langmuir.4c00440.