

УДК 629.5:629.04

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-37-56

КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ В СУДНОБУДУВАННІ: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ

А.Г. Нужин

аспірант кафедри «Будівельна механіка та конструкція корпусу корабля»

drewlya@gmail.com

ORCID ID: 0009-0003-7502-6520

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв

Анотація. У статті здійснено системний аналіз потенціалу композитних матеріалів у сучасному суднобудуванні, зокрема з погляду їх функціонального призначення, довговічності, технологічної сумісності та екологічної доцільності. Метою роботи є досягнення науково обґрунтованої класифікації композитних матеріалів, придатних до використання в суднобудуванні, а також виявлення перспективних напрямів їх застосування та обмежень в умовах морського середовища. У процесі дослідження використано оглядово-аналітичний підхід, що включає методи типологізації, порівняльного аналізу фізико-механічних характеристик матеріалів, критичної оцінки літературних джерел та сучасних нормативних документів. Джерельну базу становлять понад 30 наукових публікацій. Сформовано функціональну класифікацію композитних матеріалів за ознаками хімічної природи, типом армування, джерелом походження та сферою застосування. Виокремлено п'ять перспективних типів композитів: полімерні армовані (FRP), синтактичні піни, гібридні композити, неорганічні вогнестійкі системи та екологічно орієнтовані біокомпозити. Для кожного з них наведено опис властивостей, типові сфери застосування, технологічні переваги й експлуатаційні обмеження. Наукова новизна дослідження полягає у міждисциплінарному підході до оцінки композитів у контексті морського середовища – з урахуванням не лише конструкційних та економічних, а й екологічних і нормативно-регуляторних факторів. Окреслено перспективи подальшої інтеграції композитів у критично важливі елементи суднових систем із одночасним розвитком технологій рециклінгу та ремонту. Практична значущість результатів полягає у можливості їх використання для прийняття рішень на етапах вибору матеріалів, проектування, стандартизації та оновлення флоту. Представлені висновки можуть бути враховані при розробці національних та галузевих рекомендацій щодо впровадження композитних матеріалів у морське машинобудування.

Ключові слова: композитні конструкції; синтактичні піни; полімерні матриці; морські технології; гібридні матеріали; екологічна ефективність; ремонтпридатність; суднобудівна інженерія.

UDC 629.5:629.04

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-37-56

COMPOSITE MATERIALS IN SHIPBUILDING: PROSPECTS AND CHALLENGES

A. Nuzhyn

PhD Student of the Department of «Structural Mechanics and Ship Hull Design»

drewlya@gmail.com

ORCID ID: 0009-0003-7502-6520

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. *This article presents a systematic analysis of the potential of composite materials in modern shipbuilding, particularly from the perspective of their functional purpose, durability, technological compatibility, and environmental suitability. The aim of the work is to achieve a scientifically sound classification of composite materials suitable for use in shipbuilding, as well as to identify promising areas for their application and limitations in marine environments.*

The research process employs a review and analytical approach, including methods of typologization, comparative analysis of the physical and mechanical characteristics of materials, critical evaluation of literature sources, and current regulatory documents. The source base comprises over 30 scientific publications.

A functional classification of composite materials is formed based on the characteristics of chemical nature, type of reinforcement, source of origin, and field of application. Five promising types of composites are highlighted: fiber-reinforced polymers (FRP), syntactic foams, hybrid composites, inorganic fire-resistant systems, and environmentally oriented biocomposites. For each of these, a description of properties, typical areas of application, technological advantages, and operational limitations are provided.

The scientific novelty of the research lies in the interdisciplinary approach to the evaluation of composites in the context of the marine environment — considering not only structural and economic but also environmental and regulatory factors. Prospects for the further integration of composites into critical elements of ship systems, along with the development of recycling and repair technologies, are outlined.

The practical significance of the results lies in the possibility of their use for decision-making at the stages of material selection, design, standardization, and fleet renewal. The presented conclusions can be taken into account in the development of national and industry recommendations for the implementation of composite materials in marine engineering.

Keywords: *composite structures; syntactic foams; polymer matrices; marine technologies; hybrid materials; ecological efficiency; maintainability; shipbuilding engineering.*

Вступ. Сучасна морська галузь зазнає масштабних змін під впливом нових екологічних, економічних та інженерних вимог. Стрімке зростання вартості палива, посилення міжнародних стандартів щодо викидів парникових газів (зокрема вимоги MARPOL і IMO), а також прагнення до підвищення енергоефективності стимулюють пошук альтернатив традиційним конструкційним матеріалам у суднобудуванні. У цьому контексті композитні матеріали розглядаються як одна з ключових технологічних платформ для проєктування суден нового покоління.

Порівняно зі сталлю чи алюмінієм, композити мають малу питому вагу при відносно високій міцності, хімічну стійкість, антикорозійні властивості, низьку теплопровідність і немагнітність. Такі характеристики дозволяють суттєво знизити вагу корпусу судна, зменшити витрати пального, підвищити вантажопідйомність і покращити морехідні якості.

Водночас широке впровадження композитів стикається з рядом системних проблем: низька ремонтпридатність у польових умовах, складність виявлення пошкоджень, чутливість до вогню, обмежена багаторазова переробка, а також брак уніфікованих норм і методик оцінки якості. Особливої уваги потребує вибір типу композиту залежно від призначення судна, глибини занурення, типу середовища (солоня вода, тиск, температура) та функціонального навантаження.

Крім того, у суднобудівній практиці досі недостатньо опрацьовані підходи до обґрунтованого поєднання композитних і металевих елементів у гібридних конструкціях. Відсутність систематизованої класифікації композитів, орієнтованої саме на умови експлуатації в морському середовищі, ускладнює вибір матеріалів на етапі проєктування.

Усе це зумовлює необхідність комплексного аналізу сучасного стану досліджень, типології композитів, їхніх переваг, обмежень і практичної ефективності з огляду на актуальні виклики суднобудівної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття значно зріс науковий інтерес до композитних матеріалів у контексті морського застосування [2-3; 9; 11; 40]. У публікаціях провідних дослідників акцент робиться на підвищенні функціональної надійності, зменшенні маси суден, адаптації до агресивного середовища та забезпеченні довговічності. Наприклад, дослідження Gupta і Pinisetty [6] систематизують переваги полімерних композитів у надводному флоті, підкреслюючи зниження маси конструкцій до 30-40 % у порівнянні з традиційними металами.

Окрему групу публікацій складають роботи, присвячені синтактичним пінам – матеріалам, що активно використовуються у підводних апаратах завдяки своїй плавучості та здатності витримувати гідростатичний тиск (Cao et al., 2024 [4]). У статті Vizentin та співавт. [11] розглянуто довговічність таких композитів у морській воді, зокрема в умовах підвищеної солоності.

Суттєвим напрямом є вивчення так званих «зелених» біокомпозитів на основі природного волокна та біополімерних матриць. Rajak et al. [16] визначають їх як перспективну альтернативу традиційним матеріалам за умов розвитку стійкого суднобудування, хоча наголошують на обмеженій міцності та гідрофобності.

Також варті уваги дослідження гібридних композитів, що поєднують метали та армовані полімери. Як зазначають Dolz і колеги [8], такі конструкції забезпечують покращений розподіл навантаження, проте складність їхнього виробництва вимагає вдосконалення технологій, зокрема автоматизації укладання (AFP) і інфузійного формування.

Попри активний прогрес, низка аспектів залишається малодослідженою або суперечливою. Зокрема, недостатньо комплексних порівнянь між типами композитів із прив'язкою до конкретних вузлів суден; бракує досліджень щодо терміну служби та поведінки матеріалів при багаторазовому навантаженні; ускладнена стандартизація результатів через відмінності у випробувальних методиках.

Таким чином, аналіз сучасної літератури свідчить про високу динаміку розвитку напрямку, однак водночас вказує на потребу у систематизованій типологізації матеріалів та міждисциплінарному підході до їхнього впровадження у суднобудуванні.

Відокремлення невирішених частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених композитним матеріалам, у сфері суднобудування залишається низка невирішених проблем, які істотно обмежують масове впровадження цих матеріалів у конструкції морських суден.

Передусім варто зазначити відсутність цілісної та загальноприйнятої класифікації композитних матеріалів, адаптованої до умов морської експлуатації [16]. У більшості випадків типології базуються лише на структурних або хімічних критеріях, що не враховують специфіку функціонального навантаження у судових конструкціях. Відсутність поділу за ознаками експлуатаційної зони (корпус, надбудова, глибоководна частина), режиму навантаження (статичне, динамічне, ударне) та взаємодії з морською водою знижує прикладну цінність таких класифікацій.

Крім того, у літературі спостерігається явний перекис у бік вивчення механічних властивостей нових композитів, тоді як експлуатаційні показники – ремонтпридатність, стійкість до біообрастання, довговічність у циклічному навантаженні – опрацьовані фрагментарно або взагалі відсутні. Так само недостатньо розроблені підходи до оцінки зношування композитів в умовах тривалої дії солоного середовища, ультрафіолетового випромінювання й температурних коливань.

Окремий виклик – відсутність уніфікованих методів випробування, стандартизованих для морського машинобудування. Різні автори використовують несумісні між собою критерії, що унеможливорює міждисциплінарне порівняння результатів. Аналогічно, міжнародне регулювання композитів у суднобудуванні (на відміну від авіаційної галузі) ще не сформувалося в сталу нормативну систему.

Поза тим, інтеграція композитів у реальні конструкції суден часто здійснюється на основі емпіричного досвіду або фрагментарних досліджень [12; 39]. У публікаціях практично відсутні комплексні порівняння ефективності конкретних типів композитів при використанні у конкретних елементах суден – наприклад, у корпусних панелях, обшивці, перегородках чи балках підпору. Також нерозв'язаним лишається питання поєднання композитів із металевими елементами, що

потребує додаткового опрацювання у контексті адгезії, корозійної взаємодії та термічного розширення.

Не менш важливим є екологічний аспект: відсутність усталених технологій повторної переробки композитів, що відпрацювали ресурс, ставить під сумнів довгострокову стійкість композитної стратегії в суднобудуванні.

Отже, незважаючи на значний науковий і прикладний прогрес, подальші дослідження мають бути спрямовані на усунення зазначених прогалин, формування уніфікованої класифікації, стандартизацію випробувань, обґрунтування вибору матеріалів для окремих функціональних зон суден і розробку екологічно безпечних технологій утилізації.

Мета дослідження. *Метою* даної роботи є досягнення науково обґрунтованої класифікації композитних матеріалів, придатних до використання в суднобудуванні, з урахуванням їхніх конструкційних, технологічних та експлуатаційних характеристик, а також виявлення перспективних напрямів їх застосування та обмежень в умовах морського середовища. Стаття спрямована на систематизацію знань про типи композитів відповідно до умов морської експлуатації, а також на виявлення перспектив та обмежень, пов'язаних із їхнім застосуванням у різних елементах суден.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) проаналізувати полімерні армовані композити (FRP);
- 2) піддати аналізу синтактичні піни;
- 3) розглянути гібридні композити;
- 4) піддати аналізу неорганічні та вогнестійкі композити;
- 5) проаналізувати зелені композити (екобіокомпозити);
- 6) провести узагальнену класифікацію композитних матеріалів у суднобудуванні.

Окрему увагу в дослідженні приділено матеріалам, які здатні забезпечити одночасно механічну надійність, екологічну безпечність та довговічність в умовах впливу агресивного морського середовища. Таким чином, дослідження має міждисциплінарний характер і орієнтоване на інженерну, технологічну та екологічну інтеграцію композитів у сучасне суднобудування.

Об'єкт та предмет дослідження, методи. Об'єктом дослідження є композитні матеріали, які використовуються або потенційно можуть бути використані у конструкційних елементах морських суден – зокрема, у корпусах, надбудовах, перегородках, елементах енергетичних установок і допоміжних системах.

Предметом дослідження є структурно-функціональні характеристики композитних матеріалів, їхня поведінка в умовах морського середовища, а також технологічні та експлуатаційні особливості їх застосування у суднобудуванні.

Методологічну основу дослідження складає поєднання таких підходів:

- 1) системний аналіз, що дозволяє розглядати композити як елементи складної морської інженерної системи – судна – з урахуванням взаємодії матеріалу з навколишнім середовищем, навантаженням і життєвим циклом;

2) типологічна класифікація, що передбачає поділ композитів за структурними ознаками (матриця, армування, наповнювач), походженням (синтетичні, біокомпозити), функціональним призначенням та експлуатаційними умовами;

3) порівняльний аналіз, застосований для оцінки переваг і недоліків різних типів композитів (синтактичні піни, FRP, гібридні системи тощо) в умовах морської експлуатації;

4) оглядово-аналітичний метод, використаний для узагальнення сучасного наукового доробку та ідентифікації актуальних науково-технічних проблем, що стримують широке впровадження композитів у суднобудуванні;

5) критичне інтерпретування даних, що забезпечує ідентифікацію тенденцій розвитку композитних технологій, їхню оцінку в контексті екологічної стійкості та нормативних вимог.

У межах дослідження було опрацьовано понад 30 наукових публікацій, а також нормативні документи, що регламентують застосування композитів у морській техніці.

Дослідження не є експериментальним у традиційному розумінні, проте базується на порівнянні результатів випробувань, поданих у літературі, з урахуванням параметрів навантаження, середовища, тривалості експлуатації та способів виробництва.

Основний матеріал дослідження. На основі систематичного аналізу сучасної наукової та технічної літератури композитні матеріали, що використовуються у суднобудуванні, доцільно класифікувати за типом матриці, видом армування, функціональним призначенням та рівнем технологічної зрілості. У межах цієї статті розглянуто п'ять ключових груп композитів, що мають найвищий потенціал для практичного застосування у морській техніці, розглянуто їх фізико-механічні властивості, технологічні особливості, сфери застосування, а також переваги та обмеження в морському середовищі.

1. Полімерні армовані композити (FRP)

Полімерні композити з армуванням (Fiber Reinforced Polymers – FRP) є найбільш поширеним та широко використовуваним класом композитів у суднобудуванні. До них належать матеріали з полімерною матрицею (зазвичай поліефірної, вінілестерної або епоксидної смоли) та армуванням зі скловолокна GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic), вуглеволокна CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), кевлару або їхніх комбінацій [1, 7, 33, 35-37].

Перспективи в суднобудуванні:

– Зниження ваги та підвищення енергоефективності: офіційні звіти та дослідження класифікаційних товариств (наприклад, Lloyd's Register, DNV, ABS) підтверджують значне зниження ваги судових конструкцій при використанні FRP порівняно зі сталлю, що безпосередньо призводить до зменшення витрати палива та викидів.

– Підвищена корозійна стійкість та довговічність: нормативні документи та рекомендації з проектування суден з композитних матеріалів наголошують на високій стійкості FRP до корозії в морському середовищі, що зменшує витрати на обслуговування та продовжує термін служби судна.

- Оптимізація гідродинаміки корпусу: формувальність FRP дозволяє створювати складні обводи корпусу з гладкою поверхнею, що зменшує опір води та покращує гідродинамічні характеристики судна.
- Немагнітність: важлива для спеціалізованих суден, таких як тральщики.
- Інтеграція функціональності: композитні матеріали дозволяють інтегрувати різні функції, такі як теплоізоляція або радіопрозорість, безпосередньо в конструкцію.

Виклики для суднобудування:

- Забезпечення пожежної безпеки: горючість полімерних матриць та виділення токсичних газів при горінні є серйозною проблемою, що регулюється міжнародними конвенціями (наприклад, SOLAS). Розробка вогнестійких FRP та впровадження систем пожежогасіння є критично важливими.
- Вартість та складність ремонту: висока початкова вартість деяких видів FRP та складність кваліфікованого ремонту пошкоджень можуть обмежувати їхнє застосування.
- Проблеми утилізації та переробки: відсутність розвиненої інфраструктури для переробки FRP відходів є екологічним викликом.
- Стандартизація та сертифікація: необхідність розробки уніфікованих стандартів проектування, виготовлення та випробування композитних конструкцій для суднобудування.

FRP-композити широко використовуються у малих і середніх суднах, катерах, рибальських човнах, а також у надбудовах великих суден. Застосовуються для виготовлення декоративних та функціональних елементів інтер'єру, трапів, люків, вентиляційних каналів, трубопроводів.

2. Синтактичні піни

Синтактичні піни (СП) є особливим видом композитних матеріалів, які складаються з легкого заповнювача, зазвичай у формі мікросфер, що оточені матрицею, зазвичай полімерною або металевою. Ці матеріали демонструють унікальні механічні властивості, такі як висока міцність при низькій щільності, що робить їх ідеальними для використання в суднобудуванні.

Структура та властивості синтактичних пін. Синтактичні піни зазвичай складаються з мікросфер, виготовлених з матеріалів, таких як скло, кераміка або полімери, які заповнені повітрям або газом. Це забезпечує їм низьку щільність (зазвичай від 300 до 600 кг/м³) і високу міцність на стиск (до 80 МПа). Завдяки своїй структурі, синтактичні піни мають відмінні акустичні та теплоізоляційні властивості, що робить їх привабливими для використання в конструкціях, де важливі легкість і теплоізоляція [6; 18; 22-25; 32; 34].

Перспективи в суднобудуванні:

- Забезпечення плавучості та зниження ваги: низька щільність та висока плавучість роблять синтактичні піни ідеальними для використання в плавучих елементах, таких як буї, понтони, а також у серцевинах сендвіч-панелей для полегшення конструкцій.

– Тепло- та звукоізоляція: повітряні порожнини в мікросферах забезпечують хороші ізоляційні властивості, що може бути важливим для комфорту екіпажу та збереження вантажу.

– Стійкість до гідростатичного тиску (деякі види): спеціальні типи синтактичних піл зберігають свої властивості на великих глибинах, що робить їх придатними для підводних апаратів.

– Легкість: синтактичні піли можуть бути на 30-50 % легшими за традиційні матеріали, що дозволяє зменшити загальну вагу судна і, відповідно, витрати на паливо.

– Корозійна стійкість: вони не підлягають корозії, що зменшує витрати на обслуговування і продовжує термін служби судна.

– Висока міцність: синтактичні піли демонструють високу міцність на стиск і вигин, що робить їх ідеальними для використання в конструкціях, що підлягають високим навантаженням.

– Акустичні властивості: завдяки своїй структурі, синтактичні піли здатні поглинати звук, що робить їх корисними для військових суден і підводних апаратів.

Виклики для суднобудування:

– Обмежена структурна міцність: синтактичні піли зазвичай не використовуються як основні несучі елементи конструкцій через їхню відносно низьку міцність.

– Вартість високоякісних наповнювачів: використання міцних та легких мікросфер може значно збільшити вартість.

– Потенційне вологовбирання: залежно від полімерної матриці та якості мікросфер, можливе поглинання вологи, що може вплинути на властивості матеріалу.

– Обмежений досвід використання: оскільки синтактичні піли є відносно новими матеріалами, їх використання в суднобудуванні все ще обмежене, і немає достатньої кількості даних про їх довговічність у реальних умовах експлуатації.

– Проблеми з обробкою: обробка синтактичних піл може бути складнішою, ніж обробка традиційних матеріалів, що потребує спеціалізованого обладнання та технологій.

Синтактичні піли активно використовуються в суднобудуванні, зокрема в конструкціях малих суден, надбудовах, а також у системах, що забезпечують плавучість. Наприклад, компанії, такі як Trelleborg, використовують синтактичні піли в конструкціях підводних апаратів, що підтверджує їхню надійність і ефективність у морських умовах. Крім того, синтактичні піли активно досліджуються для використання в нових типах суден, таких як автономні підводні апарати та військові судна, де важливі легкість і акустичні характеристики.

3. Гібридні композити

Гібридні композити поєднують у собі два або більше різних армуючих матеріалів в одній полімерній матриці або використовують комбінацію різних композитних матеріалів у конструкції (наприклад, скловолокно та вуглецеве волокно) для досягнення оптимального балансу між властивостями. Типовим

прикладом є композити з одночасним використанням скловолокна та вуглеволокна, або металополімерні панелі [5; 10; 14-15; 21].

Перспективи в суднобудуванні:

- Оптимізація властивостей під конкретні навантаження: гібридизація дозволяє поєднувати високу міцність одних волокон з високою ударною в'язкістю інших, забезпечуючи оптимальні характеристики для різних частин суднової конструкції.

- Зниження вартості: використання дорожчих високоефективних волокон лише в критично навантажених зонах у поєднанні з дешевшими волокнами в інших частинах може призвести до економічно ефективних рішень.

- Підвищена стійкість до пошкоджень: комбінування різних типів армування може покращити стійкість до ударів та запобігти поширенню тріщин.

- Знижене водопоглинання: порівняно з окремими компонентами.

- Вища стійкість до втоми та старіння в морському середовищі.

Виклики для суднобудування:

- Складність проектування та аналізу: проектування гібридних композитних конструкцій вимагає глибоких знань про взаємодію різних матеріалів та складних методів аналізу.

- Сумісність матеріалів: забезпечення хорошої адгезії між різними армуючими волокнами та полімерною матрицею є критично важливим.

- Складність виробництва: виготовлення гібридних композитів може бути складнішим і вимагати спеціалізованого обладнання та технологій.

Гібридні композити можуть бути корисними в несучих елементах корпусу, балках, а також у багатофункціональних модулях.

4. Неорганічні та вогнестійкі композити

Ці матеріали засновані на матрицях із силікатів, кераміки, базальту, цементу та неорганічних армуючих волокнах (скловолокно, базальтове волокно, сталеві волокна) [20; 38]. Основне їхнє призначення — забезпечення вогнестійкості та термічного бар'єру в критичних зонах (машинні відсіки, перегородки, евакуаційні трапи).

Перспективи в суднобудуванні:

- Критично важлива пожежна безпека: негорючість неорганічної матриці забезпечує високий рівень пожежної безпеки, що є ключовою вимогою для суднових конструкцій, ці композити не горять і не виділяють токсичних газів при нагріванні.

- Стійкість до високих температур: здатність витримувати високі температури без втрати міцності робить ці композити придатними для використання в зонах з підвищеним ризиком пожежі.

- Низька теплопровідність: забезпечує теплоізоляцію.

- Потенційна стійкість до агресивних середовищ: деякі неорганічні матриці можуть бути стійкими до впливу морської води та хімічних речовин.

- Виклики для суднобудування:
 - Висока щільність та вага: зазвичай неорганічні композити мають більшу щільність порівняно з полімерними, що може збільшувати загальну вагу судна.
 - Крихкість: неорганічні матеріали часто є крихкими, хоча армування волокнами може покращити їхню тріщиностійкість.
 - Складність обробки та формування: обробка та надання складної форми неорганічним композитам може бути технологічно складним.
 - Обмежений досвід застосування: порівняно з традиційними матеріалами, досвід використання неорганічних композитів у суднобудуванні є меншим.
- Вогнестійкі композити зазвичай не використовуються як основні структурні елементи, але є критично важливими для безпеки.

5. Зелені композити (екобіокомпозити)

Це матеріали на основі біополімерів (PLA, PHA, біоепоксида) та натуральних армуючих компонентів біорозкладних або біоосновних полімерних матриць (льон, джут, сизаль, базальт). Вони є перспективним рішенням для суднобудування з урахуванням принципів екологічної відповідальності [19; 26].

Перспективи в суднобудуванні:

- Зменшення екологічного впливу: використання поновлюваних ресурсів та біорозкладних матеріалів сприяє зниженню вуглецевого сліду та зменшенню відходів, зменшує екологічний слід після закінчення життєвого циклу.
- Потенційно низька вартість сировини (деякі види): природні волокна можуть бути дешевшими за синтетичні.
- Відновлюваність ресурсів: сировина може бути вирощена знову.
- Нетоксичність: природні волокна зазвичай є безпечними у виробництві та використанні.
- Низька щільність: сприяє зниженню маси конструкцій.

Виклики для суднобудування:

- Чутливість до вологості та біологічного руйнування: природні волокна схильні до поглинання вологості та можуть руйнуватися під впливом мікроорганізмів, що потребує спеціальної обробки.
- Нижчі механічні властивості: зазвичай зелені композити мають нижчу міцність та жорсткість порівняно з традиційними FRP.
- Нестабільність властивостей природних волокон: властивості природних волокон можуть значно варіюватися, що ускладнює забезпечення стабільної якості композитів.
- Обмежена термостійкість: природні волокна мають нижчу термостійкість порівняно зі скловолокном або вуглецевим волокном.

Екобіокомпозити мають потенціал для допоміжних елементів, меблів, внутрішнього оздоблення та надбудов легкого класу.

6. Узагальнена класифікація композитних матеріалів у суднобудуванні

З метою систематизації властивостей композитних матеріалів, що розглядаються в даному дослідженні, доцільно представити узагальнену класифікацію за критеріями: тип матриці та армування, основні фізико-механічні характеристики, сфери застосування, а також типові переваги та обмеження в морському середовищі (табл. 1).

Узагальнення в табличній формі дозволяє візуалізувати логіку вибору матеріалів відповідно до умов експлуатації, проектних вимог і технологічних ресурсів. Таке представлення є доцільним для етапів матеріалознавчого аналізу, попереднього інженерного проектування та нормативного обґрунтування впровадження композитів у цивільному та військовому флоті.

Особливої уваги заслуговує підхід до гібридизації композитних структур, а також екологічна переорієнтація галузі — з урахуванням циркулярної економіки, зменшення викидів та утилізаційних можливостей.

Обговорення отриманих результатів.

Результати дослідження підтверджують, що композитні матеріали, попри свої індивідуальні обмеження, мають великий потенціал для широкого застосування в суднобудуванні [13; 27; 29]. Основні типи композитів демонструють специфічні переваги, що дозволяє орієнтувати їх на конкретні функціональні зони суден. Послідовність обговорення отриманих результатів відповідає поставленим задачам.

1. Полімерні композити (FRP), зокрема GFRP і CFRP, залишаються основою для малих суден і надбудов завдяки їхній малій питомій вазі, корозійній стійкості та технологічній зручності формування [17; 28]. Проте їхня горючість та обмежені можливості виявлення пошкоджень накладають обмеження на застосування у великотоннажному флоті без додаткових заходів пожежної безпеки [18].

2. Синтактичні піни, на відміну від FRP, показують значну стійкість до гідростатичного тиску, що робить їх незамінними у глибоководному суднобудуванні. Їхня перевага – висока стабільність форми, мінімальна водопоглинальність та прогнозована поведінка при тривалому навантаженні – особливо важлива в зоні високого ризику, наприклад у корпусах автономних підводних апаратів або гідроакустичних буйків.

3. Гібридні композити демонструють кращий баланс між жорсткістю, міцністю і динамічною витривалістю, що дозволяє використовувати їх у несучих елементах суден з підвищеним механічним навантаженням [30]. Однак складність у виробництві та обмежені дослідження поведінки у морському середовищі потребують подальших експериментальних підтверджень їхньої довготривалої ефективності.

4. Неорганічні композити забезпечують високий рівень вогнестійкості, що особливо актуально для пасажирських суден, танкерів та військових кораблів [31]. Утім, їхня крихкість і більша маса порівняно з полімерними аналогами обмежують застосування в зонах з високими динамічними навантаженнями.

Таблиця 1

Класифікація композитних матеріалів у суднобудуванні за властивостями та функціональним призначенням

Тип композиту	Матриця / Армування	Ключові властивості	Основні сфери застосування	Переваги	Обмеження
FRP (полімерні)	Полімерна матриця (епоксидна, вінілестерна) + скловолокно, вуглецеве або арамідне волокно	Висока міцність, мала вага, корозійна стійкість, негнотніть, формотворення	Корпуси, надбудови, трапи, вентиляційні канали, внутрішнє оздоблення	Легкі, довговічні, електроізоляційні, доступні	Горючість, низька ремонтпридатність, вартість армування
Синтактичні піни	Полімерна матриця + порожнисті мікросфери (скляні, керамічні)	Легка вага, висока міцність на стиск, плавучість, стійкість до тиску й водопоглинання	Плавучі модулі, корпуси ROV/AUV, глибоководні труби, підводне обладнання	Висока глибоководна ефективність, прогнозовані властивості	Висока собівартість, обмежена формовність
Гібридні композити	Змішані волокна (скло + вуглець або інші) в полімерній матриці	Покращена втомна міцність, регульовані властивості, висока жорсткість	Силові елементи, балки, палубні панелі, структурні з'єднання	Оптимізація вартості, налаштування під задачі, висока довговічність	Складність виробництва, ризик деламінації
Неорганічні	Геополімери керамічні або цементні матриці + армування (базальт, скло, металева сітка)	Вогнестійкість, хімічна інертність, низька теплопровідність	Ізоляційні перегородки, трапи, машинні відсіки, елементи протипожежного захисту	Безпечні, не виділяють дим, високотемпературна стійкість	Крихкість, висока маса, складність обробки
Екобіокомпозити	Біополімери (PLA, біопексид) + натуральні волокна (льон, джут, конопля, сизаль, базальт)	Низька вага, біорозкладність, низька теплопровідність, екологічність	Внутрішнє оздоблення, меблі, допоміжні частини надбудов, тимчасові елементи	Екологічно безпечні, відновлювані ресурси, утилізація без токсичних відходів	Схильність до біодеградації, волога, низька механічна міцність

5. Щодо «зелених» композитів – хоча вони мають потенціал з погляду екології та стійкого розвитку, їхнє використання наразі обмежене допоміжними елементами конструкції. Недостатня гідрофобність та нижча механічна міцність ставлять під сумнів ефективність біокомпозитів в агресивному морському середовищі без попередньої хімічної модифікації.

6. Була розроблена узагальнена порівняльна таблиця проаналізованих композитних матеріалів, яка дасть зручність наглядного аналізу розглянутих композитів і допоможе у швидкому прийнятті рішень щодо можливості застосування того чи іншого композиту.

Крім функціонального порівняння, важливим чинником є технологічна готовність і доступність методів виготовлення композитів. Наприклад, FRP матеріали легко формуються за допомогою вакуумної інфузії та ручного ламінування, тоді як синтактичні піни та гібриди вимагають автоклавного формування або комп'ютерно керованого укладання.

Таким чином, композитні матеріали повинні оцінюватись не ізольовано, а як частина комплексної інженерної системи, де враховується взаємодія матеріалу, середовища, навантажень та технологічних обмежень. І саме такий інтегрований підхід забезпечить ефективність їх використання в суднобудуванні.

Висновки

Таким чином в роботі були вирішені всі задачі, які були поставлені для досягнення поставленої мети.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що композитні матеріали є не лише інженерною альтернативою традиційним конструкційним матеріалам у суднобудуванні, а й одним з ключових факторів майбутньої трансформації галузі в умовах глобальних екологічних викликів і вимог енергоефективності. Їхнє впровадження забезпечує багатогранні переваги: зменшення маси суден, підвищення корозійної та втомної стійкості, покращення гідродинамічних властивостей, зниження витрат на технічне обслуговування та продовження життєвого циклу конструкцій.

Здійснена типологізація композитів за критеріями хімічної природи, способу армування, технології виготовлення та функціонального призначення дала змогу виявити п'ять основних груп, що мають практичне значення для сучасного суднобудування. Найбільш поширеними залишаються FRP-композити, які поєднують відносну технологічну простоту з добрими механічними властивостями. Водночас синтактичні піни демонструють виняткову ефективність у підводному середовищі завдяки високій плавучості та стійкості до гідростатичного тиску, тоді як гібридні композити потенційно здатні поєднати переваги різних типів армування та матриць в одному матеріалі.

Особливої уваги заслуговують неорганічні та зелені композити. Перші – завдяки своїм вогнестійким властивостям, що критично важливо для пасажирських і військових суден. Другі – як реакція на сучасні вимоги до зменшення еколо-

гічного сліду суднобудівної продукції, хоча вони поки що потребують доопрацювання з точки зору довговічності та гідрофобності.

Наукова новизна дослідження полягає у формуванні комплексного підходу до класифікації композитних матеріалів із прив'язкою до зон судна та умов їхньої експлуатації. Також запропоновано концептуальні напрями удосконалення композитних рішень, орієнтованих на поєднання технологічності, функціональності та екологічної безпеки.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання результатів на етапах:

- вибору матеріалів у процесі проектування нових суден;
- формування технічних завдань для НДДКР у сфері матеріалознавства;
- удосконалення методик оцінки ремонтпридатності, деградації та

повторного використання композитів.

У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на таких напрямках:

- створення уніфікованих нормативних документів щодо морських композитів;
- розробка технологій відновлення та локального ремонту конструкцій із композитів без демонтажу;
- вивчення впливу біообростання та морської мікрофлори на структурну цілісність композитів;
- розробка рішень для рециклінгу багатокомпонентних композитних систем;
- автоматизація та цифровізація процесів виготовлення композитів (зокрема, через адитивні технології та роботизовані комплекси).

Таким чином, композити у суднобудуванні – це не лише матеріали, а ціла платформа для наукових і технічних інновацій, що формуватимуть обличчя флоту XXI століття.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Caramatescu A., Mocanu C.I., & Modiga A. (2019). A new concept of composite material for high speed boats. *Materiale Plastice*, 56(1), P. 11-17.
2. Saravanan, M., & Bubesh Kumar, D. (2020). A review on navy ship parts by advanced composite material. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.074>
3. Huang X., Su S., Xu Z., Miao Q., Li W., & Wang L. (2023). Advanced composite materials for structure strengthening and resilience improvement. *Buildings*, 13(10), 2406. <https://doi.org/10.3390/buildings13102406>
4. Cao S., Jiang T., Shi S., Gui X., Wang Y., Tang B., Xiang L., Dai X., Lin, D., Zhong N., Li W., Yu J., & Wu X. (2024). Fabrication and compression properties of reinforced epoxy syntactic foam with basalt fiber. *Advances in Polymer Technology*, 2024, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2024/9224136>

5. Jayakanth J.J., Mamidi V.K., Pugazhenthir R., Anbuezhian G., & Ponshanmugakumar A. (2021). An investigation on wear properties of SiC/WC strengthened aluminium alloy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, xxx(xxxx), xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.416>
6. Gupta N., Zeltmann S.E., Shunmugasamy V.C., & Pinisetty, D. (2014). Applications of polymer matrix syntactic foams. *JOM*, 66(2), P. 245-254.
7. Han, Z., Jang J., Soupez J.-B.R.G., Seo H.-S., & Oh D. (2023). Comparison of structural design and future trends in composite hulls: A regulatory review. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100558.
8. Dolz M., Martinez X., Sa D., Silva J., & Jurado A. (2024). Composite materials, technologies and manufacturing: Current scenario of European Union shipyards. *Ships and Offshore Structures*, 19(8), P. 1157-1172.
9. Koci M. (2024). Composite materials behavior analyze for desk, hull and board yacht's panel. *European Journal of Engineering and Formal Sciences*, 7(1), P. 1-10.
10. Kyzioł L. (2019). Composite materials for warship constructions. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 26(4), P. 135-140.
11. Vizin G., & Vukelic G. (2020). Degradation and Damage of Composite Materials in Marine Environment. *Materials Science (Medziagotyra)*, 26(3), P. 337-343. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.26.3.22950>
12. Imran M., Shi D., Tong L., & Waqas H.M. (2019). Design optimization of composite submerged cylindrical pressure hull using genetic algorithm and finite element analysis. *Ocean Engineering*, 190, 106443.
13. Jesthi D.K., & Nayak R.K. (2019). Evaluation of mechanical properties and morphology of seawater aged carbon and glass fiber reinforced polymer hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106980. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106980>
14. Karthik K., Rajamani D., Venkatesan E.P., Shajahan M.I., Rajhi A.A., Aabid A., ... & Saleh B. (2023). Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Carbon/Basalt/SiC Nanoparticle/Polyester Hybrid Composite Materials. *Crystals*, 13(3), 415.
15. Ardeleanu M.E., Stănescu D.G., Adam V., Scornea A., & Mihalcea I. (2019). Experimental Study of Some Composite Materials Characteristics. *2019 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, P. 1-4.
16. Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L., & Linul E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*, 11(10), 1667.
17. Tran P., Nguyen Q.T., & Lau K.T. (2018). Fire performance of polymer-based composites for maritime infrastructure. *Composites Part B*, (2018), doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.037.

18. Kemény A., Leveles B., & Károly, D. (2021). Functional aluminium matrix syntactic foams filled with lightweight expanded clay aggregate particles. *Materials Today: Proceedings*, 45, P. 4229-4232.
19. Crupi V., Epasto G., Napolitano F., Palomba G., Papa I., & Russo P. (2023). Green Composites for Maritime Engineering: A Review. *J. Mar. Sci. Eng.*, 11(3), 599..
20. Job, S. (2015). Why not Composites in Ships? *Reinforced Plastics*, 59(2), 90-93.
21. Oladele I.O., Omotosho T.F., & Adediran A.A. (2020). Polymer-Based Composites: An Indispensable Material for Present and Future Applications. *International Journal of Polymer Science*, 2020, 1-12.
22. Kim H.S., & Plubrai P. (2004). Manufacturing and failure mechanisms of syntactic foam under compression. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(8), 1009–1015.
23. Rizzi E., Papa E., & Corigliano A. (2000). Mechanical behavior of a syntactic foam: experiments and modeling. *International Journal of Solids and Structures*, 37(40), 5773-5794.
24. Kádár, Cs., Szlancsik, A., Dombóvári, Z., & Orbulov I.N. (2019). Monitoring the failure states of a metal matrix syntactic foam by modal analysis. *Materials Letters*, 257, 126733. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126733>
25. Bolat Ç., Akgün İ.C., & Gokşenli A. (2020). On the Way to Real Applications: Aluminum Matrix Syntactic Foams. *European Mechanical Science*, 4(3), P. 131-141. <https://doi.org/10.26701/ems.703619>
26. Routray S., Sundaray A., Pati D., & Jagadeb A.K. (2020). Preparation and Assessment of Natural Fiber Composites for Marine Application. *J. Inst. Eng. India Ser. D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00230-5>
27. Barsotti B., Gaiotti M., & Rizzo C.M. (2020). Recent Industrial Developments of Marine Composites Limit States and Design Approaches on Strength. *Journal of Marine Science and Application*, 19, 553-566. <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00171-1>
28. Rohith K., Shreyas S., Vishnu Appaiah K.B., Sheshank R.V., Ganesha B.B., & Vinod B. (2019). Recent Material Advancement for Marine Application. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4854-4859.
29. Rajak D.K., Pagar D.D., Kumar R., Pruncu C.I., & Pruncu C. (2019). Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>
30. Chen N.-Z., Sun, H.-H., & Guedes Soares C. (2003). Reliability analysis of a ship hull in composite material. *Composite Structures*, 62(1), P. 59-66.
31. Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P., & Challis K. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*, 53(1), P. 21-41.

32. Bakshi M.S., & Kattimani S. (2020). Study of mechanical and dynamic mechanical behavior of halloysite nanotube-reinforced multiscale syntactic foam. *J Appl Polym Sci.*, e49855. <https://doi.org/10.1002/app.49855>
33. Kim D.-U., Seo H.-S., & Jang H.-Y. (2021). Study on Mechanical Bearing Strength and Failure Modes of Composite Materials for Marine Structures. *J. Mar. Sci. Eng.*, 9(7), 726. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/jmse9070726>
34. Afolabi L.O., Ariff Z.M., Hashim S.F.S., Alomayri T., Mahzan S., Kamarudin K.-A., & Muhammad I.D. (2020). Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), P. 10698-10718.
35. Ruzuqi R. (2020). Tensile Strength Analysis of Polymer Composite Materials Fiber Reinforced in The Fiber Boat Application. *Journal of Research and Opinion*, 7(8), H. 2763-2769. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.15520/jro.v7i8.74>
36. Lee S.-G., Oh D., Woo J.H. The Effect of High Glass Fiber Content and Reinforcement Combination on Pulse-Echo Ultrasonic Measurement of Composite Ship Structures. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 379. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/jmse9040379>
37. Chalmers D.W. (1994). The Potential for the Use of Composite Materials in Marine Structures. *Marine Structures*, 7, P. 441-456.
38. Grabian J., Ślaczka W., Pawłowska P., & Kostrzewa W. (2017). The role of innovative composite materials in the safe and efficient operation of floating marine structures. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 52(124), P. 23-29.
39. Geuskens F., Jurg R., & Collier B. (2019). Tool-less Manufacturing of Composite Hulls and Superstructures.
40. Samoilescu G., Bordianu A., & Patroi E. (2019). Use of composite materials in shipbuilding. Utility and necessity. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXII(1), P. 17-20.

REFERENCES

1. Caramatescu A., Mocanu C.I., & Modiga A. (2019). A new concept of composite material for high speed boats. *Materiale Plastice*, 56(1), P. 11-17.
2. Saravanan M., & Bubesh Kumar D. (2020). A review on navy ship parts by advanced composite material. *Materials Today: Proceedings*, xxx, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.074>
3. Huang X., Su S., Xu Z., Miao Q., Li W., & Wang L. (2023). Advanced composite materials for structure strengthening and resilience improvement. *Buildings*, 13(10), 2406. <https://doi.org/10.3390/buildings13102406>

4. Cao S., Jiang T., Shi S., Gui X., Wang Y., Tang B., Xiang L., Dai X., Lin D., Zhong N., Li W., Yu J., & Wu X. (2024). Fabrication and compression properties of reinforced epoxy syntactic foam with basalt fiber. *Advances in Polymer Technology*, 2024, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2024/9224136>
5. Jayakanth J.J., Mamidi V.K., Pugazhenth R., Anbuezhian G., & Ponshanmugakumar A. (2021). An investigation on wear properties of SiC/WC strengthened aluminium alloy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, xxx(xxxx), xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.416>
6. Gupta N., Zeltmann S.E., Shunmugasamy V.C., & Pinisetty D. (2014). Applications of polymer matrix syntactic foams. *JOM*, 66(2), P. 245-254.
7. Han Z., Jang J., Soupez J.-B.R.G., Seo H.-S., & Oh D. (2023). Comparison of structural design and future trends in composite hulls: A regulatory review. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100558.
8. Dolz M., Martinez X., Sa D., Silva J., & Jurado A. (2024). Composite materials, technologies and manufacturing: Current scenario of European Union shipyards. *Ships and Offshore Structures*, 19(8), P. 1157-1172.
9. Koci, M. (2024). Composite materials behavior analyze for desk, hull and board yacht's panel. *European Journal of Engineering and Formal Sciences*, 7 (1), P. 1-10.
10. Kyzioł L. (2019). Composite materials for warship constructions. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 26(4), P. 135-140.
11. Vizin G., & Vukelic G. (2020). Degradation and Damage of Composite Materials in Marine Environment. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 26(3), 337–343. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.26.3.22950>
12. Imran M., Shi D., Tong L., & Waqas H.M. (2019). Design optimization of composite submerged cylindrical pressure hull using genetic algorithm and finite element analysis. *Ocean Engineering*, 190, 106443.
13. Jesthi D.K., & Nayak R.K. (2019). Evaluation of mechanical properties and morphology of seawater aged carbon and glass fiber reinforced polymer hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106980. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106980>
14. Karthik K., Rajamani D., Venkatesan E.P., Shajahan M.I., Rajhi A.A., Aabid, A., ... & Saleh, B. (2023). Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Carbon/Basalt/SiC Nanoparticle/Polyester Hybrid Composite Materials. *Crystals*, 13(3), 415.
15. Ardeleanu M.E., Stănescu D.G., Adam V., Scornea A., & Mihalcea I. (2019). Experimental Study of Some Composite Materials Characteristics. *2019 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, P. 1-4.
16. Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L., & Linul E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*, 11(10), 1667.

17. Tran P., Nguyen Q.T., & Lau K.T. (2018). Fire performance of polymer-based composites for maritime infrastructure. *Composites Part B*, (2018), doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.037.
18. Kemény A., Leveles B., & Károly D. (2021). Functional aluminium matrix syntactic foams filled with lightweight expanded clay aggregate particles. *Materials Today: Proceedings*, 45, P. 4229-4232.
19. Crupi V., Epasto G., Napolitano F., Palomba G., Papa I., & Russo P. (2023). Green Composites for Maritime Engineering: A Review. *J. Mar. Sci. Eng.*, 11 (3), 599..
20. Job S. (2015). Why not Composites in Ships? *Reinforced Plastics*, 59(2), 90-93.
21. Oladele I.O., Omotosho T.F., & Adediran A.A. (2020). Polymer-Based Composites: An Indispensable Material for Present and Future Applications. *International Journal of Polymer Science*, 2020, 1-12.
22. Kim H.S., & Plubrai P. (2004). Manufacturing and failure mechanisms of syntactic foam under compression. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(8), P. 1009-1015.
23. Rizzi E., Papa E., & Corigliano A. (2000). Mechanical behavior of a syntactic foam: experiments and modeling. *International Journal of Solids and Structures*, 37(40), P. 5773-5794.
24. Kádár Cs., Szlancsik A., Dombóvári Z., & Orbulov I. N. (2019). Monitoring the failure states of a metal matrix syntactic foam by modal analysis. *Materials Letters*, 257, 126733. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126733>
25. Bolat Ç., Akgün İ.C., & Gökşenli A. (2020). On the Way to Real Applications: Aluminum Matrix Syntactic Foams. *European Mechanical Science*, 4(3), P. 131-141. <https://doi.org/10.26701/ems.703619>
26. Routray S., Sundaray A., Pati D., & Jagadeb A.K. (2020). Preparation and Assessment of Natural Fiber Composites for Marine Application. *J. Inst. Eng. India Ser. D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00230-5>
27. Barsotti B., Gaiotti M., & Rizzo C.M. (2020). Recent Industrial Developments of Marine Composites Limit States and Design Approaches on Strength. *Journal of Marine Science and Application*, 19, P. 553-566. <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00171-1>
28. Rohith K., Shreyas S., Vishnu Appaiah K.B., Sheshank R.V., Ganesha B.B., & Vinod B. (2019). Recent Material Advancement for Marine Application. *Materials Today: Proceedings*, 18, P. 4854-4859.
29. Rajak D.K., Pagar D.D., Kumar R., Pruncu C.I., & Pruncu C. (2019). Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>
30. Chen N.-Z., Sun H.-H., & Guedes Soares C. (2003). Reliability analysis of a ship hull in composite material. *Composite Structures*, 62(1), P. 59-66.

31. Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P., & Challis K. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*, 53(1), P. 21-41.
32. Bakshi M.S., & Kattimani S. (2020). Study of mechanical and dynamic mechanical behavior of halloysite nanotube-reinforced multiscale syntactic foam. *J Appl Polym Sci.*, e49855. <https://doi.org/10.1002/app.49855>
33. Kim D.-U., Seo H.-S., & Jang, H.-Y. (2021). Study on Mechanical Bearing Strength and Failure Modes of Composite Materials for Marine Structures. *J. Mar. Sci. Eng.*, 9(7), 726. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/jmse9070726>
34. Afolabi L.O., Ariff Z.M., Hashim S.F.S., Alomayri T., Mahzan S., Kamarudin K.-A., & Muhammad I. D. (2020). Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), P. 10698-10718.
35. Ruzuqi R. (2020). Tensile Strength Analysis of Polymer Composite Materials Fiber Reinforced in The Fiber Boat Application. *Journal of Research and Opinion*, 7(8), P. 2763-2769. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.15520/jro.v7i8.74>
36. Lee S.-G., Oh D., Woo J.H. The Effect of High Glass Fiber Content and Reinforcement Combination on Pulse-Echo Ultrasonic Measurement of Composite Ship Structures. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 379. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/jmse9040379>
37. Chalmers D.W. (1994). The Potential for the Use of Composite Materials in Marine Structures. *Marine Structures*, 7, P. 441-456.
38. Grabian J., Ślaczka W., Pawłowska P., & Kostrzewa W. (2017). The role of innovative composite materials in the safe and efficient operation of floating marine structures. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 52(124), P. 23-29.
39. Geuskens F., Jurg R., & Collier B. (2019). Tool-less Manufacturing of Composite Hulls and Superstructures.
40. Samoilescu G., Bordianu A., & Patroi E. (2019). Use of composite materials in shipbuilding. Utility and necessity. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXII(1), P. 17-20.

Стаття надійшла до редакції 03.02.2025

Посилання на статтю: Нужин А.Г. Композитні матеріали в суднобудуванні: перспективи та виклики // *Вісник Одеського національного морського університету*: 36. наук. праць, 2025. № 3 (77). С. 37-56. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-37-56.

Article received 03.02.2025

Reference a journal artic: Nuzhyn A. Composite materials in shipbuilding: prospects and challenges // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 3 (77). P. 37-56. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-37-56.