УДК 629.5.023:678.664
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).2

INVESTIGATION OF THE OPERATIONAL DURABILITY, FIRE SAFETY, AND PROCESSABILITY OF HYBRID SYNTACTIC COMPOSITES FOR SMALL-SCALE SHIPBUILDING

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ, ВОГНЕБЕЗПЕКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ГІБРИДНИХ СИНТАКТНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ МАЛОТОННАЖНОГО СУДНОБУДУВАННЯ

Andrii G. Nuzhyn
drewlya@gmail.com
ORCID: 0009-0003-7502-6520

А. Г. Нужин,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose*. To comprehensively assess the durability, fire-safety performance, chemical resistance, and manufacturability of hybrid syntactic composites based on an elastic polyurethane matrix containing mineral (expanded perlite) and organic (expanded polystyrene) fillers, and to substantiate their application in small-vessel structures. *Method*. A comparative experimental study of the physicochemical and service properties of the composites was performed. Continuous UV irradiation was used to assess atmospheric ageing; prolonged exposure to aggressive media to evaluate chemical resistance; and direct exposure to an open flame to determine self-extinguishing behaviour and the nature of the residual protective framework. Manufacturability was assessed through high-speed CNC milling, mechanical fastening tests, and contact moulding with ED-20 epoxy resin. *Results*. The elastic polyurethane matrix was found to form a protective surface skin that limits UV degradation, while perlite provides an additional shielding effect. All investigated formulations demonstrated high resistance to salt water and alkalis. The mineral-filled composite exhibited virtually complete inertness to hydrocarbons, whereas in the polystyrene-filled composites the polymer shell prevented direct contact between gasoline and the filler. Fire tests showed the formation of a protective char layer and self-extinguishing behaviour in the organic-filled formulations; the high perlite content formed a non-combustible mineral framework. Mechanical machining caused no significant filler chipping, while strong adhesion to ED-20 enabled the fabrication of monolithic sandwich panels. *Scientific novelty*. For the first time, a causal relationship was established between filler type in an elastic polyurethane matrix and the functional survivability of the composites under the synergistic action of aggressive marine-environment factors. *Practical importance*. The results substantiate differentiated use in small-vessel construction: organic-filled formulations are suitable for lightweight, highly elastic hull elements, whereas the mineral-filled formulation is recommended for insulating inter-hull spaces in machinery and boiler rooms, fuel compartments, and adjacent barrier zones.
Key words: syntactic foams; polyurethane matrix; fire resistance; chemical resistance; UV ageing; mechanical fastening; epoxy resins.

Анотація. *Мета*. Комплексно оцінити довговічність, пожежно-технічні характеристики, хімічну стійкість і технологічність гібридних синтактних композитів на основі еластичної поліуретанової матриці з мінеральним (спучений перліт) та органічним (спінений полістирол) наповнювачами й обґрунтувати напрями їх застосування в конструкціях малих суден. *Методика*. Проведено порівняльне експериментальне дослідження фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей композитів. Для оцінювання атмосферного старіння застосовано безперервне УФ-опромінення; хімічної стійкості – тривале експонування в агресивних середовищах; пожежної безпеки – прямий вплив відкритого полум'я з визначенням здатності до самозатухання та характеру залишкового каркаса. Технологічність оцінено за результатами високошвидкісного фрезерування на верстатах з ЧПК, випробувань механічного кріплення та контактного формування з епоксидною смолою ЕД-20. *Результати*. Встановлено, що еластична поліуретанова матриця формує захисну поверхневу кірку, яка обмежує УФ-деструкцію, а перліт забезпечує додатковий екрануючий ефект. Усі досліджені склади характеризуються високою стійкістю до солоної води та лугів. Мінеральний наповнювач забезпечує практично повну інертність до вуглеводнів, тоді як у композитах із полістиролом полімерна оболонка перешкоджає прямому контакту бензину з наповнювачем. Вогневі випробування показали формування коксівного захисного шару

та самозатухання складів з органічним наповнювачем; високий вміст перліту формує негорючий мінеральний каркас. Механічна обробка не спричиняє істотного викришування наповнювача, а висока адгезія до ЕД-20 забезпечує можливість виготовлення монолітних сендвіч-панелей. *Наукова новизна*. Уперше встановлено причинно-наслідковий зв'язок між типом наповнювача в еластичній поліуретановій матриці та функціональною живучістю композитів за синергетичного впливу агресивних чинників морського середовища. *Практична значимість*. Обґрунтовано диференційоване застосування композитів у малотоннажному суднобудуванні: складів з органічним наповнювачем – для легких високоеластичних елементів корпусу, мінерального складу – для ізоляції міжкорпусного простору машинно-котельних відділень, паливних відсіків та прибартерних зон.
Ключові слова: синтактні пінопласти; поліуретанова матриця; вогнестійкість; хімічна стійкість; УФ-старіння; механічна фіксація; епоксидні смоли.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Експлуатація малотоннажних суден різного призначення (цивільних, рятувальних, спеціальних та військово-або патрульних катерів) проходить у надзвичайно жорстких і динамічних умовах навколишнього середовища. Специфіка суднобудівних конструкцій вимагає від заповнювачів міжкорпусного простору та внутрішніх елементів не лише мінімальної питомої ваги і низького водопоглинання, але й високої довговічності. У реальному плаванні композитні матеріали піддаються синергетичному впливу цілої низки деструктивних чинників: тривалому фотохімічному впливу сонячного (ультрафіолетового) випромінювання, контактному впливу агресивної морської води, а також випадковому або технологічному контакту з вуглеводневими сполуками (нафтопродуктами, бензином, дизельним паливом та мастилами).

Особливе місце в системі безпеки судноплавства посідає проблема пожежної безпеки матеріалів. Традиційні пінопласти (наприклад, немодифікований спінений полістирол чи пінополіуретани без антипіренів) характеризуються високою горючістю, швидким поширенням полум'я та інтенсивним димоутворенням із виділенням токсичних продуктів піролізу. Це створює критичну загрозу для живучості судна та безпеки екіпажу. Тому створення синтактних композитів із контрольованою вогнестійкістю – шляхом заміни органічних фаз на мінеральні наповнювачі (такі як спучений перліт у складі П30) або за рахунок ефекту карбонізації матриці (як у складі С20) – є надзвичайно актуальним завданням для сучасного матеріалознавства.

Крім експлуатаційної стійкості, вирішальним фактором для успішного впровадження нових композитів у суднобудівну практику є їхня технологічність. Матеріал заповнювача повинен легко піддаватися механічній обробці (різанню, фрезеруванню на ЧПК-верстатах), стабільно утримувати механічні елементи кріплення (саморізи, болтові з'єднання), а головне – забезпечувати високу адгезійну міцність при контакті з конструкційними смолами (зокрема, епоксидними зв'язуючими типу ЕД-20) без додаткового застосування складних і коштовних праймерів.

З огляду на це, оцінка тривалої експлуатаційної стійкості до зовнішніх чинників (УФ-випромінювання, хімічні середовища), аналіз показників пожежної безпеки та підтвердження високої технологічності розроблених гібридних синтактних пінопластів є логічним і необхідним етапом для визначення реальних галузей їх практичного використання в малотоннажному суднобудуванні.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що застосування тришарових (сендвіч) конструкцій із легким заповнювальним ядром є одним із найефективніших методів зниження маси корпусу та забезпечення непотоплюваності малих суден [7, 11]. Поряд із традиційними комірчастими та стільниковими заповнювачами, значну увагу дослідників привертають синтактні пінопласти (Syntactic Foams) – композиційні матеріали, що отримуються шляхом введення порожнистих сферичних наповнювачів або гранульованих систем у полімерну матрицю [1, 6]. Проте при переході від лабораторних випробувань до реальної експлуатації у суднобудуванні вирішальними стають вимоги до довговічності, пожежної безпеки та технологічності таких матеріалів [10, 11].

Дослідження деградації полімерних композитів під впливом зовнішніх чинників навколишнього середовища розглядаються у працях багатьох науковців. Зокрема, у роботах, присвячених атмосферному та сольовому старінню суднобудівних матеріалів [3, 11], зазначається, що комбінована дія сонячного ультрафіолетового випромінювання та солоного морського туману провокує фотоокиснювальну деструкцію поверхневих шарів полімерних матриць. Це призводить до утворення мікротріщин, втрати глянцю та зниження механічних показників [3]. При цьому зазначається, що введення дисперсних або мінеральних наповнювачів може створювати бар'єрний ефект, захищаючи глибокі шари матеріалу від фотодеструкції [1, 9].

Окремим критичним аспектом для заповнювачів міжкорпусного простору є хімічна стійкість при контакті з судновими експлуатаційними рідинами (бензином, дизельним паливом, мастилами та морською водою) [5, 7]. Праці дослідників поліуретанових та епоксидних систем показують, що органічні наповнювачі, такі як спінений полістирол (EPS),

виявляють високу чутливість до розчинників та неполярних вуглеводнів, що вимагає їх надійної ізоляції у суцільній безпористій полімерній оболонці [6, 13]. У той же час, використання неорганічних мінеральних наповнювачів (зокрема, спученого перліту) дозволяє суттєво підвищити хімічну інертність матеріалу [2, 12], проте потребує вирішення проблеми компенсації його підвищеної насипної щільності та контролю пористості.

Питання вогнестійкості та пожежної безпеки суднобудівних заповнювачів посідають чільне місце в міжнародних вимогах (зокрема, стандартах IMO та Регістру судноплавства) [10, 11]. Традиційні газонаповнені пінопласти на основі полістиролу та пінополіуретану належать до категорії горючих матеріалів з високим димоутворенням та виділенням токсичних продуктів піролізу [10]. Науковці активно шукають шляхи зниження горючості полімерних композитів за рахунок додавання антипіренів або формування карбонізованого захисного шару (коксового панцира) при термічному розкладі матриці [1, 14]. Дослідження показують, що часткова або повна заміна органічного наповнювача на спучений перліт (мінеральну фазу) дозволяє сформувати практично негорючий каркас, який не підтримує самостійного горіння і запобігає поширенню полум'я [2, 12].

З точки зору виробничої технології суднобудування, вирішальне значення має технологічність обробки композиту та його адгезійна сумісність із зовнішніми формотворчими шарами (скло- або вуглепластиковими обшивками) [5, 7]. Наукові публікації, присвячені механічній обробці синтактних пінопластів, підкреслюють проблему викришування гранул наповнювача під час високошвидкісного фрезерування на ЧПК-верстатах та формування підвищеної шорсткості поверхні [8]. Крім того, забезпечення високої міцності зсуву на межі розділу «заповнювач – епоксидне зв'язуюче» без застосування вартісних ґрунтовок або праймерів залишається актуальною інженерною задачею [4, 5].

Незважаючи на наявність значного обсягу досліджень, присвячених окремим властивостям синтактних матеріалів, комплексний аналіз сумісного впливу УФ-випромінювання, агресивних хімічних середовищ, вогнестійкості та механіко-технологічних характеристик для гібридних систем на основі еластичного поліуретану з комбінованим (органічним та мінеральним) наповнювачем висвітлений недостатньо. Це обумовлює необхідність проведення системних експериментальних досліджень у даному напрямку.

З точки зору виробничої технології суднобудування, вирішальне значення має технологічність обробки композиту та його адгезійна сумісність із зовнішніми формотворчими шарами (скло- або вуглепластиковими обшивками). Наукові публікації, присвячені механічній обробці синтактних пінопластів, підкреслюють проблему викришування гранул наповнювача під час високошвидкісного фрезерування на ЧПК-верстатах та формування підвищеної шорсткості поверхні. Крім того, забезпечення високої міцності зсуву на межі розділу «заповнювач – епоксидне зв'язуюче» без застосування вартісних ґрунтовок або праймерів залишається актуальною інженерною задачею.

Незважаючи на наявність значного обсягу досліджень, присвячених окремим властивостям синтактних матеріалів, комплексний аналіз сумісного впливу УФ-випромінювання, агресивних хімічних середовищ, вогнестійкості та механіко-технологічних характеристик для гібридних систем на основі еластичного поліуретану з комбінованим (органічним та мінеральним) наповнювачем висвітлений недостатньо. Це обумовлює необхідність проведення системних експериментальних досліджень у даному напрямку.

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених розробці та випробуванню синтактних пінопластів і заповнювачів для сендвіч-конструкцій [6, 7], низка важливих прикладних задач у галузі малотоннажного суднобудування залишається розв'язаною не повною мірою.

По-перше синергія фотодеструкції та хімічної деградації в умовах суднової експлуатації. Більшість існуючих досліджень розглядають вплив ультрафіолетового випромінювання [3, 9] або агресивних вуглеводневих середовищ (пально-мастильних матеріалів) [5, 13] окремо. Проте для заповнювачів міжкорпусного простору малих суден критичним є розуміння того, як поверхневі зміни полімерної матриці під дією УФ-випромінювання впливають на її бар'єрні властивості щодо проникнення бензину та морської води [3, 11].

По-друге забезпечення вогнестійкості без втрати вагових та еластичних характеристик. Введення традиційних антипіренів у поліуретанові системи часто призводить до суттєвого подорожчання матеріалу, збільшення його питомої ваги та погіршення еластичності матриці [1, 10]. Застосування мінерального наповнювача (спученого перліту у складі П30) [2, 12] або ефекту самозатухання за рахунок карбонізації (у складі С20) [1, 14] демонструє високий потенціал, однак потребує чіткого порівняльного аналізу механізмів їхньої поведінки при прямому термічному впливі.

По-третє технологічна оброблюваність та механічне утримання елементів. У суднобудівній практиці заповнювачі піддаються високошвидкісному механічному фрезеруванню на верстатах з ЧПК для надання складної геометрії шпангоутів та флорів [5, 8]. Недостатньо вивченими залишаються явища

локального плавлення матриці чи викришування гранул наповнювачів під час механічної обробки [8], а також здатності таких композитів стабільно утримувати точкові механічні кріплення (саморізи, нагелі) без пом'якшення структури.

По-четверте адгезійна сумісність із формотворчими смолами. Проблема забезпечення надійної адгезії між заповнювальним ядром та зовнішніми захисноконструкційними шарами (зокрема, епоксидними зв'язуючими типу ЕД-20) без додаткового використання вартісних ґрунтовок або складних технологій підготовки поверхні залишається відкритою [4, 5]. Визначення здатності розроблених складів формувати монолітну суцільну структуру є вирішальним для запобігання міжшаровому розшаруванню корпусу під час динамічних навантажень [7, 11].

Таким чином, необхідність комплексного експериментального оцінювання довговічності, вогнестійкості, механічної оброблюваності та адгезійної сумісності гібридних синтактних композитів на основі еластичного поліуретану з перлітом та полістиролом обумовлює актуальність даного дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є комплексне експериментальне оцінювання довговічності, пожежної безпеки та технологічності розроблених гібридних синтактних композитів на основі еластичної поліуретанової матриці з мінеральним (спучений перліт) та органічним (спінений полістирол) наповнювачами, а також обґрунтування раціональних галузей їх практичного використання в конструкціях корпусу малих суден.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Сформувати комплексну програму та адаптувати методики експериментальних досліджень, що поєднують стандартні лабораторні випробування з прикладними інженерними тестами для всебічної оцінки експлуатаційної надійності гібридних композитів.

2. Вивчити вплив ультрафіолетового (УФ) випромінювання та атмосферного старіння на стабільність структури та зовнішнього вигляду синтактних пін.

3. Оцінити хімічну стійкість розроблених складів до дії агресивних рідин, характерних для експлуатації суден, зокрема до впливу вуглеводнів (бензину, дизельного пального) та солоної води.

4. Дослідити вогнестійкість та характер термічної деструкції гібридних структур.

5. Перевірити технологічність механічної обробки та агдезійну сумісність із конструкційними епоксидними шарами.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В якості об'єктів дослідження використовувалися гібридні синтактні композити на основі еластичної поліуретанової матриці *Everad RPM VP 2664/12* з двома типами наповнювачів: органичним – спіненим полістиролом (склади С10 та С20) та мінеральним – спученим перлітом у співвідношенні 70 на 30 (склад П30).

В основу даного дослідження покладено комплексний емпіричний підхід, що базується на порівняльному аналізі експлуатаційної стабільності, довговічності та технологічних властивостей гібридних синтактних композитів. Застосована методологія передбачає послідовну оцінку поведінки матеріалів під впливом екстремальних чинників (УФ-випромінювання, агресивні вуглеводні, солона вода та відкритий вогонь), а також аналіз їхньої технологічності при механічній обробці та формуванні сендвіч-структур. Це дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між типом наповнювача (органічним EPS чи мінеральним перлітом) та підтвердити функціональну живучість і пожежну безпеку розроблених заповнювачів у складі корпусних конструкцій малих суден.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ ДОСЛІДЖЕННЯ

Забезпечення довговічності, пожежної безпеки та технологічності тришарових конструкцій є одним із вирішальних чинників при виборі заповнювачів для міжкорпусного простору малих суден [7, 12]. Якщо механічні та фізико-простірні параметри виготовлених композитів висвітлено у попередній праці [7], то оцінка їхньої функціональної живучості в умовах впливу агресивних факторів морського середовища та специфіки суднобудівного виробництва потребує окремого комплексного аналізу.

Експериментальні дослідження гібридних синтактних композитів на основі еластичного поліуретанового зв'язуючого *Everad RPM VP 2664/12* з органічним (спінений полістирол – склади С10, С20) та мінеральним (спучений перліт – склад П30) наповнювачами проводилися відповідно до розробленого методологічного комплексу.

1. Програма та методики експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети та забезпечення високої достовірності наукових висновків була розроблена комплексна програма експериментів, що базується на прикладних інженерних тестах. Такий методологічний підхід дозволив всебічно оцінити поведінку гібридних композитів складів П30, С10 та С20 в умовах, що максимально наближені до реальної експлуатації суднових конструкцій, а також верифікувати їхню придатність як для промислового виробництва корпусів, так і для проведення оперативних ремонтних робіт у польових умовах.

Експериментальна частина досліджень була присвячений оцінці атмосферної та хімічної стійкості матеріалів, де досліджувався вплив тривалої експозиції під ультрафіолетовим випромінюванням, термічна стабільність при знакозмінних температурах, а також стійкість до прямого контакту з агресивними

середовищами, зокрема паливно-мастильними матеріалами (бензин, дизельне пальне) та морською водою.

Паралельно з цим виконувався комплекс робіт з визначення адгезійної здатності розроблених композитів до конструкційних епоксидних шарів на основі смоли ЕД-20, що є критичним параметром для забезпечення структурної цілісності суднових сендвіч-панелей.

Завершальний цикл досліджень охоплював інженерно-механічні тести, спрямовані на оцінку експлуатаційної витривалості матеріалів. До них увійшли випробування на стійкість до концентрованого точкового навантаження, визначення здатності до надійного утримання металевих кріплень, а також органолептична та інструментальна оцінка здатності еластичної поліуретанової матриці до повного відновлення після локальних деформацій.

2. Стійкість до ультрафіолетового випромінювання та атмосферного старіння.

Дослідження стійкості до ультрафіолету (УФ) є критичним для матеріалів, що використовуються в суднобудуванні, оскільки сонячна радіація в поєднанні з солоним повітрям значно прискорює деградацію полімерів.

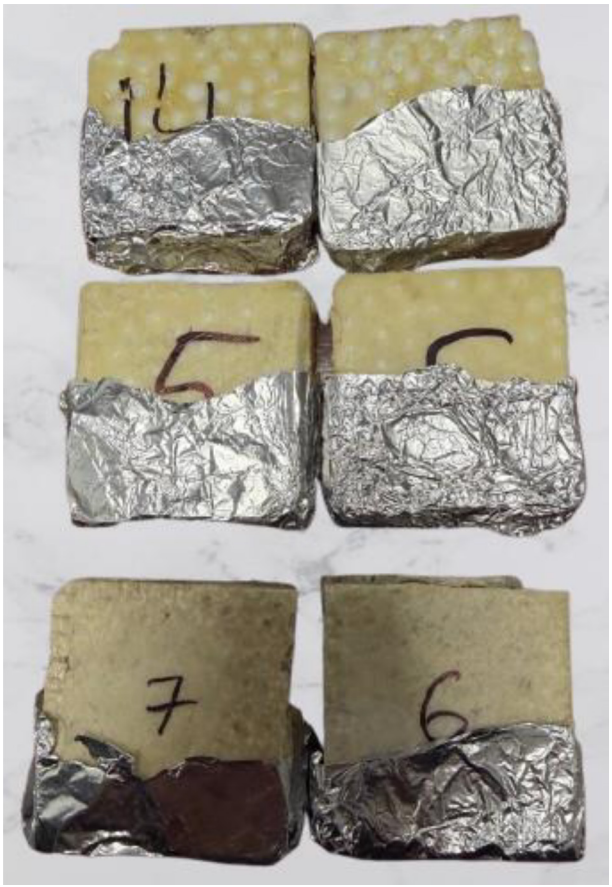


Рис. 1. Порівняльний аналіз стану поверхні зразків до та після тривалої УФ-експозиції (метод часткового екранування)

Зразки кожної серії, які зображені на рисунку 1, піддавалися прискореному вивітрюванню під впливом УФ-лампи (спектр UV-A/UV-B) протягом 100 годин, що еквівалентно кільком місяцям експлуатації під прямим сонячним промінням. Оцінювалися зміна кольору, цілісність поверхневої кірки та поява мікротріщин.

Оцінювалися зміна кольору, цілісність поверхневої кірки та поява мікротріщин. На основі експериментальних досліджень було виявлено:

– Серія С (С10, С20). Спостерігалося легке пожовтіння поверхневої ПУ-кірки. Однак, завдяки інтегральній структурі, деструкція торкнулася лише тонкого поверхневого шару (до 0,1 мм). Внутрішні гранули EPS залишилися повністю захищеними від руйнування, що підтверджує високу бар'єрну функцію матриці Everad.

– Серія П30 (Перліт). Продемонструвала найвищу УФ-стабільність. Мінеральний наповнювач (перліт) є абсолютно інертним до фотодеструкції, а висока концентрація зв'язуючого (30 %) забезпечила збереження механічної цілісності навіть за умов тривалого опромінення.

Хоча поліуретанові системи схильні до пожовтіння (що є природним для ароматичних ПУ), це не призводить до втрати плавучості або міцності зразків. Для практичного застосування у відкритих конструкціях рекомендовано покривати композит захисним шаром фарби або використовувати його як внутрішній заповнювач алюмінієвих порожнин, де доступ прямого УФ-випромінювання повністю обмежений.

3. Хімічна стійкість розроблених складів до дії агресивних рідин.

Експлуатація синтактних пінопластів у складі суднових конструкцій передбачає тривалий контакт із морською водою, а також можливий вплив нафтопродуктів та сольового туману. Метою даного етапу досліджень було встановлення коефіцієнта хімічної стійкості матеріалів після тривалої експозиції в модельних середовищах. Випробування проводилися шляхом повного занурення зразків кожної серії у три типи середовищ: 3,5 % розчин NaCl (імітація морської води), бензин марки А-95 (високоагресивне середовище для полістирольних наповнювачів) та слабкий лужний розчин (pH 9.0). Термін експозиції становив 30 діб за температури +20 ± 2 °С. Стійкість матеріалу оцінювалася за зміною маси, об'єму та візуальними ознаками деструкції (тріщини, розшарування, зміна кольору). Результати експозиції в агресивних середовищах, наведені у таблиці 1, підтвердили високу захисну здатність поліуретанової матриці, що узгоджується з даними про хімічну стійкість еластичних ПУ-систем.

Результати випробувань підтверджують достатню хімічну інертність обраної поліуретанової системи Everad RPM VP 2664/12. Особливий інтерес викликає

Таблиця 1. Результати взаємодії дослідних зразків з агресивними рідинами (експозиція 30 діб)

Зразок	Морська вода (3,5 % NaCl)	Лужне середовище (pH 9.0)	Бензин А-95
С10	Стійкий, змін структури не виявлено	Стійкий, змін структури не виявлено	Часткова деструкція. Спостерігається деструкція або розчинення гранул полістиролу в місцях порушення цілісності ПУ-оболонки
С20	Стійкий, змін структури не виявлено	Стійкий, змін структури не виявлено	Висока стійкість. Поодинокі випадки деградації наповнювача; матриця ефективно утримує структуру
П30	Стійкий, змін структури не виявлено	Стійкий, змін структури не виявлено	Абсолютна інертність. Змін структури не виявлено. Після випаровування бензину спостерігається абсорбційне видалення поверхневих забруднень без деструкції матриці

стабільність складів С у морській воді: попри високу пористість, матеріал не демонструє осмотичного розшарування. Це дозволяє рекомендувати його для використання як внутрішнього наповнювача плавучих конструкцій, що мають безпосередній контакт із забортною водою в зонах можливих протікань. Експеримент підтвердив, що мінеральний наповнювач (П30) є повністю невразливим до нафтопродуктів. У зразках серії С зафіксовано цікаву залежність: при низькому вмісті зв'язуючого (С10, 10 %) захисна оболонка є менш суцільною, що дозволяє бензину проникати до EPS. Збільшення частки еластичної матриці до 20 % (С20) суттєво підвищує хімічну живучість матеріалу.

4. Експериментальна оцінка вогнестійкості та термічної деструкції.

Оцінка вогнестійкості розроблених синтактних пінопластів є визначальним фактором для їх застосування як внутрішніх заповнювачів у суднових конструкціях. Дослідження було спрямоване на визначення здатності матеріалу до самозатухання та оцінку характеру руйнування при термічному впливі. Дослідження вогнестійкості виявило суттєву різницю в поведінці зразків залежно від типу наповнювача та концентрації зв'язуючого. Отримані результати вказують на високу термічну агресивність полістироловмісних складів при безпосередньому контакті з відкритим полум'ям.

Зразки піддавалися прямому впливу факела пальника протягом 10 секунд. Фіксувався час від моменту відведення полум'я до повного припинення горіння (самозатухання), а також візуальні ознаки деструкції матриці та наповнювача.

Результати візуального та органолептичного аналізу наступні:

– **Зразок С10 (10 % ПУ).** Продемонстрував найгірші показники. При підпалі спостерігалося майже повне вигорання внутрішньої структури. Наповнювач (EPS) миттєво оплавлявся, залишаючи порожню «шкаралупу» з клею, яка не здатна утримувати форму. Процес супроводжувався виділенням густого чорного диму з різким специфічним запахом стиролу. Це свідчить про недостатню кількість матриці для захисту гранул.

– **Зразок С20 (20 % ПУ).** Попри наявність того ж наповнювача, поводився інакше. Завдяки більшій кількості зв'язуючого відбувалося інтенсивне спінювання матриці, що створювало бар'єр. Дим також був чорним, але інтенсивність горіння була значно нижчою, а час самозатухання – мінімальним (3–5 с).

– **Зразок П30 (Перліт).** Виявився практично інертним. При контакті з полум'ям дим та запах практично були відсутні. Матеріал не підтримував горіння, лише спостерігалося локальне потемніння поверхні.

В табл. 2 представлені результати проявів термічної деструкції.

На рис. 2 продемонстровані фото зразків після вогневих випробувань.

Експериментально підтверджено, що збільшення частки зв'язуючого з 10 % (С10) до 20 % (С20) суттєво покращує вогнестійкість матеріалу. У складі С20 спостерігається ефект карбонізації: поліуретанова матриця при термічному впливі спінюється, створюючи коксовий бар'єр, який ізолює внутрішні шари полістиролу від кисню. Така поведінка корелює з результатами термічного аналізу синтактних пін на основі полімерних наповнювачів, де зазначається, що структура та тип частинок заповнювача безпосередньо впливають на теплофізичні характеристики композиту. Склад С10, попри низьку щільність, є неприпустимим для закритих об'ємів судна через високу димоутворювальну здатність та виділення токсичних продуктів термічного розкладання стиролу. Найвищу вогнестійкість продемонстрував склад П30, де мінеральний наповнювач (перліт) у поєднанні зі

Таблиця 2. Фізичні прояви термічної деструкції

Зразок	Час самост. горіння, с	Характер диму	Запах	Залишковий стан зразка
С10	5–8	Густий, чорний	Різкий (стирол)	Майже повне руйнування (пустотілий каркас)
С20	3–5	Середньої щільності	Специфічний	Збереження геометричної форми, кокс на поверхні
П30	< 5	Відсутній	Відсутній	Повна цілісність структури



Рис. 2. Візуалізація результатів вогневих випробувань: порівняння термічної деструкції зразків серії «С» (органічний наповнювач) та фазової стабільності серії «П» (мінеральний наповнювач)

зв'язуючим формує практично негорючу структуру. Це дозволяє рекомендувати П30 для зон з підвищеними вимогами до пожежної безпеки, тоді як С20 є оптимальним для загальних об'ємів плавучості завдяки швидкому самозатуханню.

5. Оцінка технологічності обробки та адгезійної взаємодії з шарами ЕД-20.

Для визначення придатності розроблених синтактних композитів до інтеграції в складні метало-полімерні конструкції суднових корпусів, зокрема в зони сполучення з алюмінієвими ребрами жорсткості, було проведено комплекс інженерних випробувань на механічну оброблюваність та витривалість. Програма досліджень охоплювала аналіз якості фрезерування на верстатах з ЧПК при високих швидкостях обертів шпинделя (18000 об/хв), стійкість до локального зминання, а також здатність матеріалу до утримання механічного кріплення без попередньої підготовки отворів. Результати випробувань, систематизовані у таблиці 3, виявили унікальну комбінацію експлуатаційних характеристик, обумовлених високою адгезійною міцністю на межі розподілу фаз «матриця–наповнювач».

Аналіз морфології поверхонь після механічної обробки (рис. 3) підтверджує, що склад С20 володіє специфічною властивістю технологічної пластичності. Локальний розігрів еластичної матриці Everad RPM при високошвидкісному різанні сприяє ефекту самогерметизації, що критично важливо для суднобудування, оскільки такий матеріал не потребує додаткової гідроізоляції торців після підрізки за місцем монтажу. Навпаки, склад С10 через низьку когезійну міцність визнано непридатним для зон із прямим монтажним навантаженням, що обмежує його застосування роллю заповнювача замкнутих порожнин. Окремої уваги заслуговує поведінка складу П30, де вкручування саморіза на критичній відстані 4 мм від кромки не призводило до руйнування масиву, що доводить високу демпфувальну здатність еластичної матриці, яка ефективно нівелює внутрішні напруження.

Наступним етапом досліджень стала оцінка взаємодії композитів з епоксидною смолою ЕД-20, яка часто використовується як захисне або сполучне покриття. Візуальний аналіз процесу змочування показав, що смола формує рівномірний глянцевий шар без ознак капілярного збирання в краплі, що свідчить про високу поверхневу енергію субстратів на базі Everad RPM. У випадку зразків С-серії епоксидний шар успішно заповнює мікрорельєф між гранулами спіненого полістиролу, створюючи армуючий

Таблиця 3. Технологічні показники та результати інженерних випробувань

Характеристика обробки	С10	С20	П30
Фрезерування	Матриця формує гладкий зріз, заплавлюються пори	Матриця формує гладкий зріз, заплавлюються пори	Сильне запилення, сформований гладкий зріз
Свердління	Отвір не тримає геометрію	Чиста стінка отвору. Матеріал працює як єдиний моноліт	Чиста стінка отвору. Матеріал працює як єдиний моноліт
Точкове навантаження	Помітне проминання в області тиску	Легке еластичне зминання; відновлення форми	Абсолютна жорсткість. Зразок не мнеться і не хрустить
Цілісність кромки (4 мм)	Блок без змін. Відсутність тріщин	Блок без змін. Відсутність розтріскування	Блок без змін. Відсутність тріщин чи відколів
Утримання саморіза	Низьке (вилучається легко)	Середнє. Вилучається із суттєвим зусиллям	Максимальне. Вилучити кріплення руками неможливо

ISSN 3154-8245 (print), 3154-8253 (online)

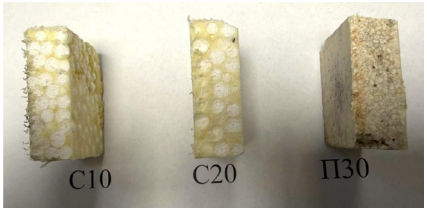


Рис. 3. Морфологія поверхонь композитів серії С20 та П30 після механічного фрезерування

зовнішній панцир, який перетворює відносно м'яку структуру на жорстку сендвіч-панель. Для зразків серії П30 попередня стабілізація матрицею спрацювала як праймер, що запобігло надмірному всмоктуванню смоли вглиб і дозволило сформувати монолітний захисний екран.

Важливою перевагою розроблених систем є їх повна хімічна сумісність з епоксидними смолами без стиролу, що підтверджується відсутністю термічного або хімічного підплавлення наповнювачів. Після повної полімеризації ЕД-20 на поверхні не виявлено ознак відторгнення, здуття або відшарування країв, що вказує на відсутність виходу повітря з пор у процесі затвердіння. Таким чином, розроблені синтактні композити можна класифікувати як високоефективні адгезійні субстрати, що дозволяють отримувати композитні вузли з високою структурною цілісністю та додатковим водонепроникним бар'єром.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ВИСНОВКИ

Отримані експериментальні дані підтверджують високу ефективність використання гібридних синтактних композитів у якості заповнювачів міжкорпусного простору малих суден [6, 7] та дають змогу розкрити фізико-хімічні механізми їхньої поведінки під дією експлуатаційних чинників.

Аналіз стійкості до фотодеструкції та хімічних середовищ. Дослідження УФ-старіння показують, що еластична поліуретанова матриця *Everad RPM VP 2664/12* утворює щільну інтегральну поверхневу кірку, яка захищає внутрішні гранули наповнювача від фотоокиснювальної деструкції [3, 9]. У складі П30 дрібнодисперсний мінеральний наповнювач (спучений перліт) додатково виконує роль фізичного бар'єра, що екранує УФ-випромінювання та запобігає глибокому меленню матеріалу, що узгоджується із висновками праць щодо мінералізованих структурних пінопластів [9, 12].

Результати занурення в агресивні середовища показують, що суцільна полімерна оболонка ізолює гранули спіненого полістиролу (EPS) у складах С10 та С20, запобігаючи їх розчиненню під дією вуглеводнів (бензину А-95) [7, 13]. Однак для складу П30 відсутність розчинних органічних фаз забезпечує абсолютну хімічну інертність, що робить його найбільш надійним матеріалом у зонах можливого контакту з пально-мастильними матеріалами та піддонними водами [2, 12].

Пожежно-технічний аналіз та вогнестійкість. Порівняльний аналіз поведінки композитів під дією відкритого полум'я демонструє принципову різницю в механізмах їхнього термічного захисту:

– Для органічних складів (С10, С20) при термічному розкладі поліуретану та термодеструкції EPS спостерігається формування коксівного панцира, який локалізує осередки горіння та забезпечує ефект самозатухання, що підтверджується дослідженнями термостійких пінопластів [1, 14].

– Для складу П30 висока концентрація спученого перліту (70/30) створює незгоральний мінеральний каркас [2, 12]. Навіть після вигоряння поверхневого шару полімерної матриці перлітовий шар запобігає поширенню полум'я та тепловому пробиттю, забезпечуючи відповідність високим вимогам пожежної безпеки в суднобудуванні [10, 12].

Оцінка технологічності та сумісності з формотворчими шарами. Високошвидкісне фрезерування зразків на верстатах з ЧПК підтвердило, що еластична матриця ефективно поглинає мікровібрації різання, запобігаючи викришуванню гранул перліту чи полістиролу, що є поширеною проблемою жорстких синтактних систем [8].

Висока адгезійна міцність при контакті з формотворчою епоксидною смолою ЕД-20 пояснюється високою поверхневою енергією поліуретану та наявністю розвиненої мікропористості на поверхні заповнювача [4, 5]. Це гарантує формування суцільнолитих, монолітних сендвіч-панелей без загрози міжшарового розшарування під дією динамічних та хвильових навантажень [7, 11].

ВИСНОВКИ

За результатами виконання поставлених задач сформовано наступні відповідні висновки:

1. ***Методологія досліджень.*** Сформовано та апробовано комплексну програму випробувань, яка охоплює послідовну оцінку поведінки матеріалів під впливом екстремальних чинників морського середовища (УФ-випромінювання, агресивні вуглеводні, солона вода та відкритий вогонь), а також аналіз їхньої технологічності при механічній обробці. Це дозволило всебічно оцінити придатність матеріалу для використання у суднових сендвіч-конструкціях.

2. ***Атмосферна стабільність.*** Досліджено вплив УФ-випромінювання та встановлено, що деградаційні процеси мають виключно поверхневий характер (фотостаріння тонкої плівки ПУ), не впливаючи на структурну цілісність та механічну міцність внутрішнього масиву композиту.

3. ***Хімічна резистентність.*** Експериментально підтверджено інертність розроблених складів до дії солоної води та вуглеводнів (бензин А95). Відсутність набухання та розчинення наповнювачів підтверджує

високу якість інкапсуляції гранул у полімерній оболонці.

4. ***Вогнестійкість.*** Виявлено суттєву різницю в характері термічної деструкції: склад П30 класифікується як негорючий мінерало-полімерний каркас, тоді як склад С20 демонструє властивість самозатухання, що мінімізує поширення полум'я в міжкорпусному просторі.

5. ***Технологічність та адгезія.*** Підтверджено бездоганну технологічність обробки на ЧПК-верстатах та сумісність із конструкційними шарами на основі смоли ЕД-20. Встановлено, що мікрорельєф поверхні композитів сприяє формуванню міцного адгезійного контакту, перетворюючи систему на монолітну сендвіч-панель.

На основі встановлених закономірностей, склад С20 рекомендується як пріоритетний заповнювач для відсіків плавучості та зон бортового наповнення, де критичною є мінімальна вага. Склад П30 доцільно використовувати у конструкціях, що вимагають підвищеної вогнестійкості та жорсткості (переборки машинного відділення, фундаменти під обладнання). Для забезпечення довговічності при контакті з прямим сонячним світлом, рекомендується захищати відкриті поверхні композиту шаром епоксидного ламінату або поліуретановими емалями.

Напрямки подальших досліджень. Перспективним вектором розвитку даної роботи є перехід до проектування інтегральних метало-композитних конструкцій. Планується дослідження адгезійної взаємодії композитів з алюмінієвими профілями безпосередньо в процесі полімеризації для створення монолітних силових вузлів корпусу. Такий підхід дозволить розглядати заповнювач не лише як засіб забезпечення плавучості, а як активний конструкційний елемент, що підвищує загальну жорсткість та живучість судна при одночасному зниженні його металоємності.

Інформація про використання штучного інтелекту. Відповідно до вимог Закону України «Про академічну доброчесність» (№ 4742-IX від 18.12.2025 р., ВВР, 2026, № 13, ст. 35) щодо прозорості та розкриття методів і засобів дослідження, автор підтверджує, що під час підготовки цієї статті було використано інструменти генеративного штучного інтелекту (великі мовні моделі Gemini / ChatGPT) виключно як допоміжний засіб. Штучний інтелект застосовувався для мовно-стилістичного редагування тексту, структурного систематизування проміжних даних та форматування інформаційних матеріалів. Генерація первинних емпіричних даних, проведення експериментальних випробувань, їхня наукова інтерпретація, формування концептуальних висновків та підготовка остаточної редакції статті виконані автором самостійно. Автор несе повну відповідальність за достовірність наведених у публікації результатів і відсутність недекларованих запозичень.

REFERENCES

[1] Amith, S. J., Rajan, B. S., & Kumar, A. (2020). Thermal stability and flammability characteristics of phenolic syntactic foam core sandwich composites. *Journal of Composite Materials*, 54(18), 2485–2496. https://doi.org/10.1177/0021998319899144

[2] Çelik, A. G., & Depci, T. (2021). Development of lightweight fire-resistant perlite-polyurethane composite materials. *Journal of Building Engineering*, 43, Article 102540. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102540

[3] Davies, P., & Rajapakse, Y. D. (Eds.). (2018). *Durability of composites in the marine environment*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65040-1

[4] Easybond Specific Adhesive Ltd. (2026). *Polyurethane adhesives in bonding porous perlite cores to structural skins* (Technical Report). Easybond Ltd. https://www.easybondadhesive.com/polyurethane-adhesive-report

[5] Gopalsamy, B. M., Mondal, S., & Ghosh, A. (2021). Machinability and surface integrity of polymer composite sandwich structures during CNC milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1142–1154. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.035

[6] Gupta, N., Zeltmann, S. E., & Shunmugasundaram, M. (2018). Applications of syntactic foams in marine structures: A review. *Materials & Design*, 160, 1220–1235. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.040

[7] Gürkan, I., & Akaya, O. (2021). Sandwich panels and cores in marine shipbuilding: Development trends. *Journal of Shipbuilding and Marine Technology*, (4), 45–58. https://doi.org/10.1016/j.jsmt.2021.04.005

[8] Ismail, S. O., & Dhakal, H. N. (2019). Machinability and surface integrity of syntactic foams during CNC milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9), 3411–3422. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03423-0

[9] Khedrouche, O., & St-Pierre, N. (2022). Effect of mineral fillers on UV degradation of polyurethane-based structural foams. *Polymer Degradation and Stability*, 195, Article 109780. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109780

[10] Mouritz, A. P. (2019). Fire properties of polymer composite materials for marine structures. *Marine Structures*, 64, 112–129. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.11.006

[11] Patsnap Marine Tech. (2025). *Research on foam-core composites for marine applications* (Patsnap Marine Tech Report). https://eureka.patsnap.com/report-research-on-foam-core-composites-for-marine-applications

[12] Perlite Institute. (2023). *Perlite in lightweight formed products and fire-rated core materials* (Technical Bulletin). https://www.perlite.org/perlite-in-lightweight-formed-products/

[13] Siddique, R., & Khatib, J. (2020). Properties of polyurethane foams containing recycled expanded polystyrene particles. *Construction and Building Materials*, 230, Article 116968. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116968

[14] Wang, X., Zhang, Q., & Xing, W. (2022). Flame retardancy and charring mechanism of polyurethane/layered silicate composites. *Progress in Organic Coatings*, 162, Article 106590. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106590

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Amith, S. J., Rajan, B. S., & Kumar, A. (2020). Thermal stability and flammability characteristics of phenolic syntactic foam core sandwich composites. *Journal of Composite Materials*, 54(18), 2485–2496. https://doi.org/10.1177/0021998319899144

[2] Çelik, A. G., & Depci, T. (2021). Development of lightweight fire-resistant perlite-polyurethane composite materials. *Journal of Building Engineering*, 43, Article 102540. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102540

[3] Davies, P., & Rajapakse, Y. D. (Eds.). (2018). *Durability of composites in the marine environment*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65040-1

[4] Easybond Specific Adhesive Ltd. (2026). *Polyurethane adhesives in bonding porous perlite cores to structural skins* (Technical Report). Easybond Ltd. https://www.easybondadhesive.com/polyurethane-adhesive-report

[5] Gopalsamy, B. M., Mondal, S., & Ghosh, A. (2021). Machinability and surface integrity of polymer composite sandwich structures during CNC milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1142–1154. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.035

[6] Gupta, N., Zeltmann, S. E., & Shunmugasundaram, M. (2018). Applications of syntactic foams in marine structures: A review. *Materials & Design*, 160, 1220–1235. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.040

[7] Gürkan I., Акая О. (2021) Сендвіч-панелі та заповнювачі в морському суднобудуванні: тенденції розробки. *Журнал кораблебудування та морських технологій*. № 4. С. 45–58. https://doi.org/10.1016/j.jsmt.2021.04.005

[8] Ismail, S. O., & Dhakal, H. N. (2019). Machinability and surface integrity of syntactic foams during CNC milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9), 3411–3422. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03423-0

[9] Khedrouche, O., & St-Pierre, N. (2022). Effect of mineral fillers on UV degradation of polyurethane-based structural foams. *Polymer Degradation and Stability*, 195, Article 109780. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109780

[10] Mouritz, A. P. (2019). Fire properties of polymer composite materials for marine structures. *Marine Structures*, 64, 112–129. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.11.006

[11] Patsnap Marine Tech. (2025). *Research on foam-core composites for marine applications* (Patsnap Marine Tech Report). https://eureka.patsnap.com/report-research-on-foam-core-composites-for-marine-applications

[12] Perlite Institute. (2023). *Perlite in lightweight formed products and fire-rated core materials* (Technical Bulletin). https://www.perlite.org/perlite-in-lightweight-formed-products/

[13] Siddique, R., & Khatib, J. (2020). Properties of polyurethane foams containing recycled expanded polystyrene particles. *Construction and Building Materials*, 230, Article 116968. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116968

[14] Wang, X., Zhang, Q., & Xing, W. (2022). Flame retardancy and charring mechanism of polyurethane/layered silicate composites. *Progress in Organic Coatings*, 162, Article 106590. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106590

© Нужин А. Г.

Дата першого надходження статті до видання: 15.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)