

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2021.2\(485\).1](https://doi.org/10.15589/znp2021.2(485).1)
УДК 629.5.023

APPLICATION FEATURES OF LOW-PRESSURE POLYETHYLENE AS A MATERIAL OF HULL STRUCTURES OF SMALL VESSELS

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНУ НИЗЬКОГО ТИСКУ В ЯКОСТІ МАТЕРІАЛУ КОРПУСНИХ КОНСТРУКЦІЙ МАЛИХ СУДЕН

Alla A. Hrabenko
111016@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2841-1659
Anatoliy I. Kuznetsov
anatolii.kuznietsov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5149-3181

А. А. Грабенко,
аспірант
А. І. Кузнецов,
канд. техн. наук

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

Abstract. Alternative construction materials have a great importance in the construction of small vessels. A convincing substantiation of the effectiveness of their application for certain types of ships of a small floor is necessary. In the practice of world small shipbuilding, the use of low-pressure polyethylene (high-density polyethylene – HDPE) as a material for hull structures has been used for a long time. This fact requires drastic changes in the technical policy of the Shipping Register of Ukraine. Ignoring this structural material leads to the need for certification of vessels produced by domestic manufacturers outside Ukraine. For customers of small vessels, the need to select structural materials is limited, first of all, by the possibility of comparing HDPE structures (operational and economic characteristics) with alternative materials. Comparison only in terms of strength and cost parameters of the manufacture of structures is not correct. It is necessary to consider all aspects of the creation and operation of structures for the entire life of the vessel. The influence of material characteristics on general design solutions, operating features, durability of structures and the costs of manufacturing and using structures for the entire life cycle of the vessel is considered. The purpose of the work is to generalize, systematize, analyze the characteristics of HDPE as hull structures of small vessels and develop criteria for the applicability of the material for structures of small vessels for various purposes. The paper analyzes the strength, technological, environmental properties of HDPE used as hull structures of small vessels. The advantages and disadvantages of this material for the manufacture of hull structures of small ships are considered. The types of small vessels for which the use of this material will be close to optimal have been identified. The direction of development of criteria of applicability for the manufacture of hull structures of small vessels for various purposes is given. A complete model of the operation of hull structures of small vessels, developed by the authors, is used as a tool for evaluating the criteria. The results allow making an informed choice for customers of small vessels for various purposes.

Key words: Small vessels; low-pressure polyethylene; constructions; efficiency of structures; application features.

Анотація. Альтернативні конструкційні матеріали мають велике значення у будівництві малих суден. Однак необхідне переконливе обґрунтування ефективності їх застосування для окремих типів суден малого флоту. У практиці світового малого суднобудування досить давно використовується в якості матеріалу корпусних конструкцій поліетилен низького тиску (поліетилен високої щільності, ПНТ). Цей факт вимагає внесення рішучих змін в технічну політику Регістру Судноплавства України. Ігнорування даного конструкційного матеріалу призводить до необхідності сертифікації суден, що виробляються вітчизняними виробниками, за межами України. Для замовників малих суден необхідність вибору конструкційних матеріалів обмежується, зокрема, можливістю порівняння конструкцій з ПНТ (експлуатаційні та економічні характеристики) з альтернативними матеріалами. Порівняння тільки за міцністю та вартісними параметрами виготовлених конструкцій не є коректним. Необхідно розглядати всі аспекти створення та експлуатації конструкцій за весь термін життєдіяльності судна. Розглядається вплив характеристик матеріалу на загальні проєктні рішення, особливості експлуатації, довговічність конструкцій і витрати на виготовлення і використання конструкцій за весь цикл життя судна. Мета роботи полягає в узагальненні, систематизації, аналізі характеристик ПНТ як корпусних конструкцій малих суден і виробленні критеріїв застосовності матеріалу для конструкцій малих суден різного

призначення. У роботі аналізується міцність, технологічні й екологічні властивості ПНТ, використовуваного як корпусні конструкції малих суден. Розглядаються переваги та недоліки даного матеріалу для виготовлення корпусних конструкцій малих суден. Виявлено типи малих суден, для яких застосування даного матеріалу буде близьким до оптимального. Дається напрям вироблення критеріїв застосовності для виготовлення корпусних конструкцій малих суден різного призначення. Як інструмент для оцінки критеріїв використовується повна модель експлуатації корпусних конструкцій малих суден, розроблена авторами. Результати дозволяють зробити усвідомлений вибір замовникам малих суден різного призначення.

Ключові слова: малі судна; поліетилен низького тиску; конструкції; ефективність конструкцій; особливості застосування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Необхідність даного дослідження полягає в тому, що з'явився новий конструкційний матеріал для малих суден, який вимагає оцінки з точки зору застосування, ефективності, економічності, екологічності та особливостей експлуатації. Розглянутий матеріал як конструкційний використовується для виготовлення корпусів малих суден в Норвегії, США, деяких європейських країнах. Останнім часом робляться спроби серійного виробництва малих суден з цього матеріалу у вітчизняному суднобудуванні. На жаль, вони стримуються відсутністю визнання даного матеріалу Регістром Судноплавства України (РУ). Сьогодні національні виробники малих суден з конструкціями з поліетилену низького тиску (далі – ПНТ) змушені сертифікувати свою продукцію за межами України. Наявна консервативність у виборі матеріалів корпусних конструкцій малих суден і відсутність критеріїв, відповідно до яких ПНТ може бути рекомендований для застосування як матеріал корпусних конструкцій малих суден різного призначення, стримує поширення даного матеріалу. У нашому дослідженні робиться спроба створення формалізованих критеріїв застосовності матеріалу і аналізу деяких особливостей його застосування в малому суднобудуванні.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Найбільш повна схема порівняння різних конструкційних матеріалів для малих суден представлена в роботі [1]. Схема розглядає життєвий цикл малого судна з урахуванням усіх можливих факторів, на які впливає матеріал корпусних конструкцій. У роботах [2] і [3] аналізуються властивості ПНТ, використовуваного в якості корпусних конструкцій малих суден, і дається напрям вироблення критеріїв застосовності для виготовлення корпусних конструкцій малих суден різного призначення.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Основна проблема полягає у відсутності можливостей потенційних замовників малих суден оцінити переваги і недоліки ПНТ в складі корпусних конструкцій і здійснити порівняння з проєктними рішеннями з конструкціями з альтернативних матеріалів.

МЕТА СТАТТІ

Мета статті полягає в узагальненні, систематизації, аналізі характеристик ПНТ як корпусних конструкцій малих суден і виробленні критеріїв застосовності матеріалу для конструкцій малих суден різного призначення.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Конструкції малих суден з поліетилену низького тиску (поліетилену високої щільності) можуть виконуватися методом зварювання і методом ротаційного формування.

Для малих суден дуже важливою характеристикою є відносна маса конструкцій, що істотно впливає на експлуатаційні параметри об'єкта.

Оскільки технологічні обмеження у вигляді мінімальних товщин і параметрів зварювання корпусних конструкцій стосовно даного матеріалу відсутні, можна порівнювати відносні маси конструкцій за міцністю вихідного матеріалу. Поняття межі плинності для даного матеріалу є досить умовним. З огляду на це порівняння можливе за руйнівними навантаженнями.

Для ПНТ:

- руйнівні напруги при розтягуванні – 18–32 МПа;
- руйнівні напруги при згинанні – 20–40 МПа;
- руйнівні напруги при стисканні – 20–36 МПа.

Отже, порівняння характеристик розглянутого матеріалу з характеристиками традиційно застосовуваних матеріалів для конструкцій суден необхідно проводити на межі тимчасової міцності.

Якщо приймати відносну масу сталевих корпусних конструкцій за 1, то відносна маса конструкцій з ПНТ з урахуванням величини межі тимчасової міцності сталі – 380 МПа, ПНТ – 30 МПа, щільності сталі – 7850 кг/м³, ПНТ – 970 кг/м³ – становитиме 0,64. Це свідчить про те, що за однакової міцності конструкції з ПНТ будуть легше конструкцій з суднобудівної сталі і наблизатимуться за своїми характеристиками до конструкцій з легкого сплаву (Алг). Порівняння з результатами аналізу, наведеного в роботі [1] (див. табл. 1).

Таблиця 1. Порівняння відносних мас корпусних конструкцій

Сталь	Легкий сплав	Деревина	Армований пластик	Армоцемент	ПНТ
1,0	0,6	0,7–1,1	0,5–0,7	1,2–1,75	0,64

Відносна маса корпусних конструкцій розглядається в еквівалентних за вимогами дотримання міцності умовах.

Усі конструкційні матеріали, що застосовуються в суднобудуванні, мають свої переваги і недоліки. Стосовно розглянутого матеріалу можна зробити порівняння (див. табл. 2).

Деякі переваги ПНТ є дуже суттєвими для використання матеріалу в будівництві робочих,

службових і патрульних суден (простота експлуатації обслуговування та ремонтів, протистояння ударним навантаженням, довговічність конструкцій). Наявні обмеження в деяких випадках вимагають нестандартних конструктивних рішень через високий коефіцієнт теплового розширення. Застосування для яхт є сумнівним.

Розглянемо конструкції малого судна з ПНТ згідно зі схемою, зазначеною в роботі [1], з урахуванням всіх основних факторів, що впливають на створення, експлуатацію та утилізацію корпусних конструкцій.

1. Фактор впливу на архітектурно-конструктивний тип і експлуатаційні характеристики судна

Вплив на формування проектуваного судна і експлуатаційні характеристики істотно залежить від відносної маси корпусних конструкцій. Відносна маса конструкцій визначає свободу загальнопроектних рішень: чим менша маса конструкцій, тим більше можливостей для збільшення дедвейту, підвищення швидкості тощо. У роботі [2] наведені дані про відносну масу конструкцій малих суден з ПНТ (відповідно до схеми оцінки, викладеної в роботі [1]). Зведені результати показані в Табл. 3.

Таблиця 2. Переваги та недоліки корпусних конструкцій з ПНТ

Переваги	Недоліки	1	2
1	2		
Мала питома вага матеріалу, що компенсує в конструкціях відносно невисоку міцність	Відносно невисока міцність	Проста утилізація конструкцій шляхом переробки у вторинний поліетилен	Слизькі поверхні палуб і необхідність наклепки нековзних покриттів або рифлення поверхонь
Висока опірність ударним навантаженням без залишкових деформацій і руйнувань. Особливості сприйняття матеріалом локальних навантажень призводять до перерозподілу напружень в зоні їх застосування та відновлення початкової форми конструкцій	Високий коефіцієнт теплового розширення. Складність установки рушіїв з валолініями	Термін будівництва серійних моделей становить 8–16 тижнів	Тільки візуальна перевірка якості зварювання
Позитивна плавучість конструкцій, що значно спрощує забезпечення непотоплюваності малого судна	Істотна залежність жорсткості від температури навколишнього середовища	Низька радіолокаційна відбивність підвищує скритність поліцейських суден і катерів берегової охорони	Зварні шви в підводній частині корпусу повинні бути безперервними (без старту / стопа)
Стійкість проти обростання	Протистояння деградації матеріалу від ультрафіолетового випромінювання досягається включеннями технічного вуглецю, оскільки чорний колір конструкцій сприяє збільшенню терміну експлуатації судна	Здатність самоочищення біля кульових отворів	Хладноплинність
		Висока ремонтпридатність конструкцій в польових умовах	Наявність слідів на ЗО від приварювання набору (зварювальні деформації)
		Екологічна чистота виробництва	Необхідна чистота в складальному приміщенні для забезпечення якості зварювання
		Кожне судно може бути укомплектоване відносно недорогим обладнанням і ремонтними комплектами для ремонту конструкцій у польових умовах	Неможливість фарбування поверхонь конструкцій обмежує можливість застосування дизайнерських рішень для прогулянкових суден

Таблиця 3. Відносна маса конструкцій і відносний вплив матеріалів на свободу прийняття рішень при проектуванні судна

№	Матеріал	Примітка	Віднос. Маса	Віднос. Вплив на свободу прийняття рішень
1.	Сталь (база)	Суднобудівна сталь кат.А	1,0	1,0
2.	Легкий сплав	АМг6	0,6	1,66
3.	Деревина	Рейка	0,9	1,1
		Клінкер	0,9–1,1	1,1–0,91
		Рейка багатошарова	0,8–0,9	1,25–1,1
		Фанера	0,73	1,37
		Холодно формований ламінат	0,7	1,43
4.	Арм. пластик	Моноліт	0,7	1,43
		Сендвіч	0,5	2,0
5	Армоцемент	Ідеальне виконання	1,2	0,83
		Прийнятне виконання	1,75	0,57
6	ПНТ	Зварні конструкції	0,64	1,56

2. Фактор співвідношення загальних мас корпусних конструкцій

Дане співвідношення простежується у колонці «Відносна маса» Табл. 3. Показник для конструкцій з ПНТ перебуває дуже близько до показника конструкцій з легких сплавів (0,64 / 0,6). Матеріал є перспективним для конструкцій швидкісних суден.

3. Фактор вартості виготовлення корпусних конструкцій

У Табл. 4 наведені відносні вартості виготовлення корпусних конструкцій малих суден з різних матеріалів (дані з верфей півдня України). Порівнювалися вартості одиниці маси конструкцій (\$ / кг).

Таблиця 4. Відносна вартість виготовлення корпусних конструкцій

№	Матеріал	Віднос. вартість конструкцій*
1.	Сталь (база)**	1,0
2.	Легкий сплав	4,6–5,4 (2,76–3,24)***
3.	Деревина	6,5–8,0 (5,53–6,8)***
4.	Арм. пластик	1,2–3,0 (0,84–2,1)***
5	Армоцемент	Немає даних
6	ПНТ	2,19–2,63(1,4–1,68) ***

* Дані локальні, можуть відрізнятися від розташування верфей і податкової політики
 ** Не розглядається наплення плазмового анодного покриття
 *** Дані в дужках вказані з урахуванням коригування на відносну масу корпусних конструкцій

4. Фактор терміну служби

Термін служби корпусних конструкцій малих суден з конструкціями з ПНТ на даний момент досить достовірно визначеним не може бути через відносно недавнє застосування матеріалу в якості корпусних конструкцій малих суден. Обмежені дані дозволяють прогнозувати термін експлуатації як 50+. Порівняння відносних термінів експлуатації конструкцій, виконаних з різних матеріалів, наведені в Табл. 5.

Таблиця 5. Відносний термін служби

Сталь	Легкий сплав	Деревина	Армований пластик	Армоцемент	ПНТ
1,0	2+	1–4	0,5	2+	2+

5. Фактор обслуговування конструкцій в експлуатації

Експлуатація суден, конструкції яких виготовлені з різних матеріалів, істотно відрізняється за обсягом ремонтів, обслуговування конструкцій, зовнішнім виглядом конструкцій у процесі експлуатації, отже, і за видатками на утримання. Співвідношення основних експлуатаційних характеристик для конструкцій з різних матеріалів представлені в Табл. 6. Слід брати до уваги, що в даній таблиці колонка, що оцінює

ремонт в разі пошкоджень, має на увазі ушкодження, пов'язані зі старінням конструкцій, і не бере до уваги аварійні пошкодження.

Таблиця 6. Співвідношення основних експлуатаційних характеристик

Матеріал	Капітальний ремонт	Ремонт у разі пошкоджень	Фарбування
Сталь (базовий варіант)	1,0 (0,2)	1,0	1,0 (0,42–1,67)
Легкий сплав	0	4,6–5,4 (2,76–3,24)	0,67 (0,42–1,67)
Деревина	0	6,5–8,0 (5,53–6,8)	1,0–2,0 (0,42–1,67)
Армований пластик	0	1,2–3,0 (0,84–2,1)	0,2 (0,17–0,42)
Армоцемент	0	Немає даних	0,67 (0,42–1,67)
ПНТ	0	0	0

6. Фактор ліквідності

За оцінками експертів, відносна ліквідність малих суден може перебувати (за схемою, запропонованою в роботі [1]) в проміжку між ліквідністю суден зі сталевими і легкосплавними конструкціями (див. Табл. 7).

Таблиця 7. Співвідношення показників ліквідності

Сталь	Легкий сплав	Деревина	Армований пластик	Армоцемент	ПНТ
1,0	2	5+	0,5-	0	1,5

7. Фактор утилізації конструкцій

Шкала оцінки фактора утилізації приведена в табл. 8.

Таблиця 8. Співвідношення характеристик утилізації

Сталь	Легкий сплав	Деревина	Армований пластик	Армоцемент	ПНТ
1 (0,05)*	5,4 (0,27)*	0,5 (0,025)*	-1 (-0,07)*	0,0	(0,025)*

* Дані в дужках вказані щодо вартості виготовлення корпусних конструкцій базового варіанту.

Модель експлуатації корпусних конструкцій з ПНТ (аналогічно до приведеної в роботі [1]) являє собою витрати на виготовлення конструкцій на початку життєвого циклу плюс реалізацію конструкцій як вторинної сировини в його кінці. Відносні витрати на виготовлення і експлуатацію корпусних конструкцій за повний життєвий цикл порівняно з базовим варіантом сталевих конструкцій, де вартість конструкцій прийнята за 1, приведені до моменту введення судна в експлуатацію (див. Рис. 1). Ці ж витрати припадають на 1 рік експлуатації судна (див. Рис. 2). Норма дисконту приймалася рівною 0,1.

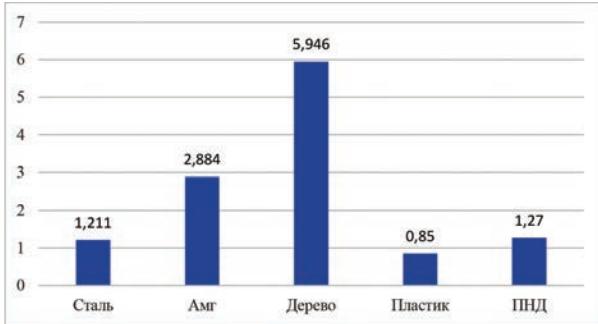


Рис. 1. Відносні витрати на виготовлення і експлуатацію конструкцій

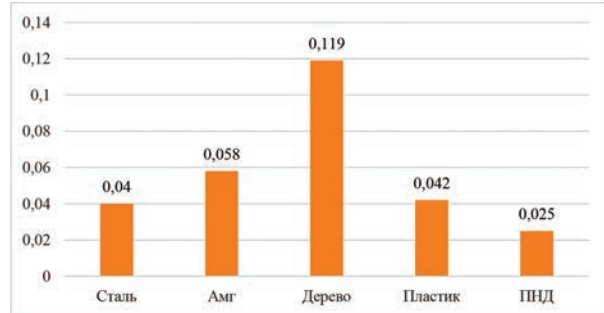


Рис. 2. Відносні витрати на рік служби конструкцій

Висновки. Поліетилен низького тиску як матеріал корпусних конструкцій малих суден є конкурентним і перспективним матеріалом для будівництва

робочих, службових і патрульних суден. Можливе застосування для моторних яхт бюджетного класу, які претендують на тривалий термін експлуатації.

REFERENCES

- [1] Kuznetsov A. *Analiz celesoobraznosti primeneniya materialov korpusnykh konstrukcij dlya malyh sudov* [Analysis of the feasibility of using materials for hull structures for small vessels]. *Vostochno Evropejskij Nauchnyj ZHurnal – East European Scientific Journal*, 2020, vol. 2, pp. 126–132.
- [2] Kuznetsov A., Hrabenko A. (2020). *Polietilen nizkogo davleniya v kachestve materiala korpusnykh konstrukcij* [Low pressure polyethylene as a material for hull structures]. *Materiali naukovo-tehnichnoi konferencii «Innovacii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnici»* [Proceedings of the scientific and technical conference "Innovations in shipbuilding and ocean engineering"]. Mykolaiv.
- [3] Kuznetsov A., Hrabenko A. (2021). *Kriterii primenimosti polietilena nizkogo davleniya v kachestve materiala korpusnykh konstrukcij malyh sudov* [Applicability criteria of low-pressure polyethylene as a material for hull structures of small vessels]. *Materiali vseukrains'koi naukovo-tehnichnoi konferencii z mizhnarodnoyu uchastyu «suchasni tekhnologii proektuvannya, pobudovi, ekspluatatsii i remontu suden, mors'kih tekhnichnih zasobiv i inzhenernih sporud»* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference with International Participation "Modern Technologies for Design, Construction, Operation and Repair of Ships, Marine Equipment and Engineering Structures"]. Mykolaiv.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кузнецов А.И. Анализ целесообразности применения материалов корпусных конструкций для малых судов. *East European Scientific Journal*. 2015. Т. 2. С. 126–132.
- [2] Кузнецов А.И., Грабенко А.А. Полиэтилен низкого давления в качестве материала корпусных конструкций : материалы научно-технической конференции «Иновации в суднобудуванні та океанотехніці», НУК. Миколаїв, 2020.
- [3] Кузнецов А.И., Грабенко А.А. Критерии применимости полиэтилена низкого давления в качестве материала корпусных конструкций малых судов : материалы Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», НУК. Миколаїв, 2020.

© Грабенко А. А., Кузнецов А. И.
 Дата надходження статті до редакції: 09.06.2021
 Дата затвердження статті до друку: 28.06.2021