

© Россомаха О. А., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Александровська Н. І.

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СУДНОБУДУВАННІ ТА СУДНОРЕМОНТІ: СВІТОВИЙ ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

У статті розглянуто сучасний стан і перспективи розвитку адитивних технологій в світі та в Україні. Проведено аналіз ринку адитивних технологій та 3D-друку в суднобудівництві, показано, що розмір світового ринку 3D-друку проявляє сталі тенденції до зростання більш ніж на 14 % у 2020–2027 рр. Визначено основні напрями розвитку адитивних технологій у суднобудівництві. Найбільш суттєвою перешкодою на шляху до повноцінного впровадження 3D-друку у суднобудівництві є відсутність нормативної бази її використання. Проведено аналіз сучасних матеріалів та технологій для друку суден та деталей суден в різних країнах світу. Показано, що для виконання таких проектів потрібно залучення як державної підтримки, так і приватних інвесторів, а також фінансування досліджень із розроблення та впровадження нових матеріалів та адитивних технологій.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-друк, 3D-принтер, суднобудівництво, сучасні матеріали.

Вступ. Сучасні інноваційні адитивні технології (АТ), 3D-технології і пристрої для їхнього застосування у ХХІ ст. розвиваються динамічно та охоплюють усе більше напрямів у галузі суднобудування при створенні суден різноманітного призначення. На сьогодні у суднобудуванні впроваджено низку рішень, починаючи з сертифікованого гребного гвинта, що друкується на 3D-принтері, до регулювання питань використання високих технологій та інтелектуальної власності в морському судноплаванні. Крім того, спостерігається зростаюче впровадження 3D-друку, також відомого як адитивне виробництво, для ремонту і технічного обслуговування суден. Ключові переваги цієї технології включають зниження витрат, прискорення виробництва, гнучкість проектування і доступність деталей. Незважаючи на значний потенціал, існують такі проблеми, як стандартизація, сертифікація, обмеження матеріалів і потреба в кваліфікованому персоналі. Проте, зростаюче число успішних впроваджень і багатообіцяюче майбутнє вказують на те, що ця технологія відіграватиме дедалі важливішу роль у підвищенні ефективності та стійкості морської галузі.

Технології тривимірного друку дають змогу «вирощувати» судові деталі будь-якої складності з мінімальними витратами. При цьому практично відсутні відходи виробництва, а обладнання, що використовується для реалізації адитивних технологій, потребує набагато меншої кількості обслуговуючого персоналу порівняно з традиційними методами.

Поряд із перевагами у швидкості та собівартості виготовлення продукції, ці технології вирізняються і екологічними перевагами. Вони, зокрема, зменшують викиди парникових газів і знижують рівень «теплого» забруднення.

Адитивні технології мають значний потенціал у скороченні енергетичних і матеріальних витрат під час будівництва різноманітних типів суден. Автори наголошують, що рівень застосування 3D-друку в суднобудівній галузі є показником не лише індустріальної потужності самої галузі, а й держави в цілому, а також свідченням її інноваційного розвитку.

Технології пошарового синтезу або ж 3D-друк, нині належать до найбільш динамічних напрямів «цифрового» виробництва. Вони здатні здійснити справжній прорив у багатьох сферах життя. За темпами розвитку ринок адитивних технологій значно випереджає інші виробничі галузі.

Разом з тим, в Україні фіксується суттєве відставання від провідних країн, які є лідерами у цій сфері. Дослідження факторів підтверджує, що це відставання поступово збільшується, особливо з огляду на скоординовані дії урядів, промисловості та наукових установ держав-лідерів, спрямовані на інтеграцію адитивного виробництва в промисловість. Реальне впровадження цих технологій неможливе

без інвестицій у фундаментальні та прикладні дослідження. Досвід розвинених країн демонструє, що розв'язання такого завдання потребує активної ролі уряду й системи фінансових стимулів. Розвиток цієї високотехнологічної галузі є основою забезпечення технологічної незалежності та безпеки держави.

Відповідно до стандартів ASTM (American Society for Testing and Materials), рекомендовано використовувати два ключові терміни – Additive Fabrication (AF) і Additive Manufacturing (AM). Також поширеними є синонімічні поняття – additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing і freeform fabrication, які перекладаються як «адитивні технології». Водночас термін Rapid Prototyping («швидке прототипування») пропонується вилучити, оскільки він більше не відображає сутності сучасних адитивних методів [1].

Актуальність цього аналізу обумовлена необхідністю глибшого наукового осмислення соціально-економічного потенціалу та впливу технології 3D-друку на розвиток суднобудівної та судноремонтної галузі України. Вона також визначається нагальною потребою модернізації вітчизняного суднобудування відповідно до сучасних викликів та вимог, а також гармонізацією національного законодавства з міжнародними стандартами.

Стан вивченості проблеми. Вивченню окремих питань, зокрема, впливу 3D-друку на інноваційний розвиток, інтелектуальну власність, присвячені публікації іноземних вчених. Зокрема, такі проблеми вивчали: С. Бехтольд, А. Гурко, К. Джуелл, Б. Депортер, Д. Мендіс, Д. Колесников, В. Смірнов, С. Толкачєв, Б. Токарев. Є праці вітчизняних науковців: Г. Андрощука, А. Гречко, Д. Дубова, О. Кронді, С. Чернишова, О. Штефана та інших.

На думку авторів, найбільше публікацій присвячено питаннями дослідження та впровадження адитивних технологій у будівництві, якими займаються, як українські, так і закордонні науковці, зокрема Р. Бусвел [2], Д. Делгадо, П. Клайтон, В. О'Брієн [3], М. Джинджер, А. Паоліні, С. Колмансбергер, Е. Ранк [4], Ф. Сартіпі [5], О.В. Андрійчук [6], А.А. Петришина [7], О.В. Струтинська [8], Л.О. Згалат-Лозинська, О.Б. Згалат-Лозинський [9], І.О. Шинський [10], В.С. Дорошенко [11].

Однак, автори підкреслюють, що багатогранність і комплексність проблематики потребує подальших науково-технічних і економіко-правових досліджень, особливо у суднобудівній галузі.

Мета статті. Метою даної статті є дослідження особливостей використання та тенденцій розвитку адитивних технологій 3D-друку в суднобудівній галузі, а також оцінка їхнього впливу на економіку та промислові сфери як у світі, так і в Україні. Окрему увагу приділено аналізу матеріалів, що застосовуються під час реалізації адитивних технологій у процесі будівництва суден.

Виклад основного матеріалу. «3D-принтер — це пристрій, який шляхом пошарового нанесення матеріалу формує фізичний об'єкт відповідно до віртуальної тривимірної моделі. Завдяки йому можливо виготовляти практично будь-які предмети» [12].

Створення моделей здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для 3D-моделювання.

Перший 3D-принтер (рис. 1) було продемонстровано у 1984 році. Автором цієї технології став американський інженер і винахідник Чак Халл – засновник компанії «3D Systems», яка нині є одним із світових лідерів у сфері виробництва 3D-принтерів.

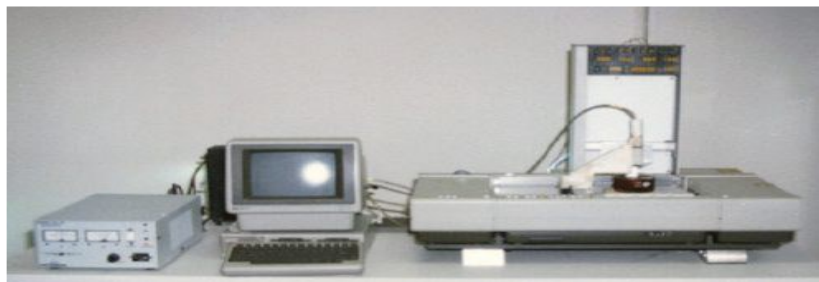


Рисунок 1 – Загальний вигляд першого 3D принтера, розробленого Чаком Халлом.
(джерело: [12]).

За дослідженням компанії Sculpteo, в якому взяло участь 1300 осіб з різних країн світу, 51 % опитаних використовувє АТ у виробництві, а не лише для прототипування. Найбільш використовуваними

технологіями 3D-друку є: моделювання методом осадження з плавленням (FDM), селективне лазерне спікання (SLS), стереолітографія (SLA) [13].

За прогнозами, до 2025 р. глобальний ринок 3D-друку досягне 32 млрд дол., а до 2030 року – 60 млрд дол.

У 2014–2020 рр. світовий ринок адитивних технологій демонстрував середньорічне зростання на рівні 19,3 %, досягнувши у 2020 році обсягу майже 14 млрд дол. Згідно зі звітом GlobalData, частка 3D-друку нині становить менш ніж 0,1 % від загального світового виробничого ринку, розмір якого оцінюється у 12,7 трлн дол. (рис. 2, 3).

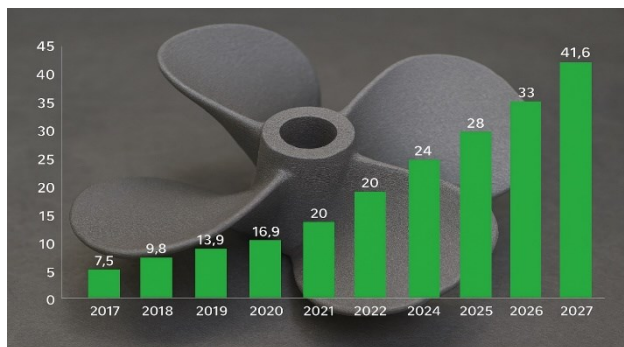


Рисунок 2 – Стан і прогноз (2020 – 2027 рр.) обсягу світового ринку АТ, млрд дол. (джерело: [14])

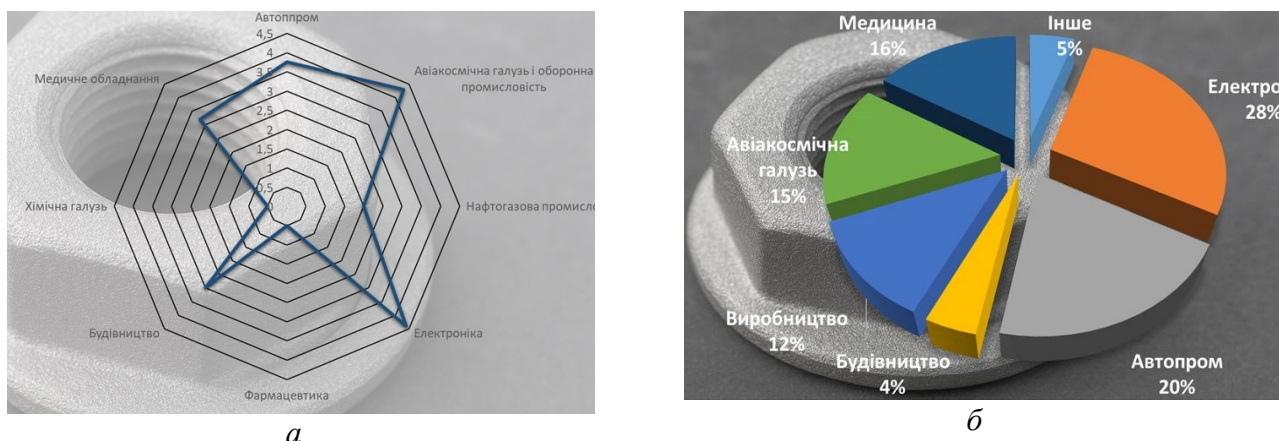


Рисунок 3 – Рівень впровадження 3D-друку по галузях до 2025 р. (а) та прогноз галузевої сегментації ринку АТ (частка сегмента до 2025р., % виручки від продажів на світовому ринку адитивних послуг (б)

(джерело: (а) на основі [15], (б) розроблено авторами на основі інтернет досліджень)

У 2013 році світовий ринок адитивного виробництва оцінювався приблизно у 3,8 млрд доларів США [16]. Лідером у цій галузі були США, за ними розташувалися Японія, Німеччина та Китай, однак із відставанням майже у чотири рази (табл. 1). Як показано в табл. 1, понад 50 % ринкової частки припадало на США та країни Європейського Союзу.

Вже через 10 років, в 2023 році ринок складав вже \$16,14 млрд, при совокупному річному темпі зростання 22,3 %.

А вже, в 2024 році, обсяг ринку адитивного виробництва перевищив позначку \$ 20 мільярдів, що є першим таким досягненням в історії галузі, згідно Wohlers Report.

Очікується, що ринок зростатиме і найближчими роками, досягнувши \$ 41,69 млрд до 2028 року.

Розмір ринку адитивного виробництва у 2024 році оцінювався в 91,84 млрд доларів США, а до 2032 року, за прогнозами, досягне 419,22 млрд доларів США зі середньорічним темпом зростання (CAGR) 20,90 % протягом прогнозованого періоду з 2025 по 2032 рік.

Таблиця 1 – Частка АМ-технологій у провідних країнах світу в 2013 році

Місце	Країна	Частка АМ – обладнання, %
1	США	38
2	Японія	9,7
3	Німеччина	9,4
4	Китай	8,7
5	Велика Британія	4,2
6	Італія	3,8
7	Франція	3,2
8	Республіка Корея	2,3
9	Канада	1,9
10	Тайвань	1,5
11	Туреччина	1,4
12	Туреччина	1,4
13	Іспанія	1,3
14	Швеція	1,2
15	Інші країни	12

Окрім аналізу ринкових сценаріїв, таких як ринкова вартість, темпи зростання, сегментація, географічне охоплення та основні гравці, ринкові звіти, підготовлені Data Bridge Market Research, також включають аналіз імпорту та експорту, огляд виробничих потужностей, аналіз споживання продукції, аналіз цінових тенденцій, сценарій зміни клімату, аналіз ланцюга поставок, аналіз ланцюга створення вартості, огляд сировини/витратних матеріалів, критерії вибору постачальників, аналіз PESTLE, аналіз Портера та нормативно-правову базу [17].

Сегментація світового ринку адитивного виробництва за типом матеріалу (метал, пластик, сплави та кераміка), технологією (стереолітографія (SLA), моделювання плавленого розташування (FDM), лазерне спікання (LS), струменеве друкування сполучними матеріалами, поліструменевий друк, електронно-променеве плавлення (EBM), виробництво ламінованих об'єктів (LOM) та інші), застосуванням (автомобільна промисловість, охорона здоров'я, аерокосмічна промисловість, споживчі товари, промисловість, оборона, архітектура та інші) – тенденції галузі та прогноз до 2032 року.

Видання BENZINGA (США) представило огляд, провідної консалтингової компанії Transparency Market Research [18]: «...у 2022 році обсяг ринку адитивних технологій у вартісному вираженні оцінювався в 466,3 млн доларів США з перспективним зростанням в середньому на 21,5 % в період з 2023 по 2031 рік. За прогнозами, до кінця 2031 року цей об'єм ринку може скласти 2,7 млрд доларів США».

Глобальний ринок адитивного виробництва за регіонами, 2023 – 2030 роки, видання представило у вигляді рис. 4.

Матеріали для 3D-друку становлять один із визначальних чинників, що впливають на якість, міцність і функціональність кінцевих виробів. Сьогодні застосовується широкий спектр матеріалів, кожен з яких характеризується власними властивостями та специфікою використання. Остаточний вибір матеріалу визначається типом друку, особливостями обладнання та завданнями конкретного проекту.

Аналіз джерел [18, 19], дозволив авторам скласти таблицю 2, де вказані основні типи та характеристики пластикових матеріалів для 3D-друку.

У своєму глобальному звіті про ринок металевих порошків для адитивного виробництва Transparency Market Research представила наступних гравців: Sandvik AB – Renishaw PLC – Praxair Technology, Inc. – BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG – Aubert & Duva – ATI – RIO Tinto – Carpenter Technology Corporation – Alcoa Inc. – GKN PLC – Miba AG – Metaldyne Performance Group – Hoganas AB – Hitachi Chemicals Co. Ltd.

Основні висновки зі звіту про світовий ринок металевих порошків для 3D-друку:

- У 2022 році частка Північної Америки у виробництві таких порошків становила 28 %.
- У 2022 році на Азіатсько-Тихоокеанський регіон припадало 42 % ринку у вартісному вираженні.
- У 2022 році найбільший дохід (61 %) приніс продаж металевих порошків на основі нержавіючої сталі.
- У 2022 році на частку Європи припадало 20 % світового ринку [20].

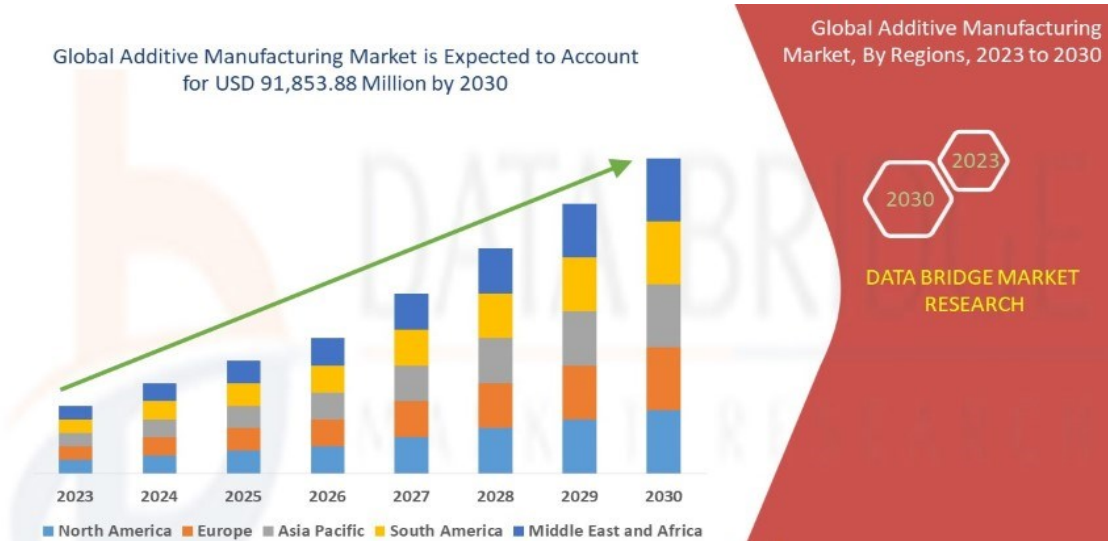


Рисунок 4 – Глобальний ринок адитивного виробництва за регіонами, 2023 – 2030 роки (джерело: [21])

Таблиця 2 – Основні типи та характеристики пластикових матеріалів для 3D-друку

№	Назва матеріала	Характеристики
1	PLA (Полімолочна кислота)	PLA – це один із найпоширеніших матеріалів для 3D-друку. Його виготовляють із відновлюваної сировини, зокрема кукурудзяного крохмалю чи цукрової тростини, що робить його екологічно безпечним. Цей матеріал добре підходить для створення прототипів, декоративних виробів і навчальних моделей. PLA забезпечує високу точність друку і є зручним вибором для початківців.
2	ABS (Акрилонітрил-бутадієнстирол)	ABS є ще одним поширеним матеріалом для 3D-друку, що вирізняється високою міцністю та стійкістю до високих температур. Його застосовують для виготовлення деталей, здатних витримувати значні механічні навантаження. Процес друку з ABS є складнішим, адже він вимагає підвищених температур екструзії (приблизно 210 – 250 °C) і використання нагрітої платформи для уникнення деформацій готової моделі. Цей матеріал знаходить широке застосування в автомобільній промисловості, а також використовується для створення прототипів і функціональних виробів.
3	PETG (Полімер терефталат-гліколь)	PETG – це комбінація кращих властивостей PLA та ABS. Він міцний, гнучкий, стійкий до дії вологи та хімічних речовин. PETG добре підходить для виготовлення функціональних деталей, які будуть використовуватися на відкритому повітрі або постійно піддаватися навантаженню. Це відмінний вибір для створення прозорих деталей, так як матеріал має високий ступінь прозорості.
4	Фотополімери	Фотополімери використовуються в 3D-принтерах, які працюють за технологіями SLA або DLP, де модель створюється шляхом затвердіння рідкої смоли під впливом ультрафіолетового світла. Ці

		матеріали забезпечують високу точність та гладкість поверхні, що робить їх ідеальними для створення моделей із тонкими деталями.
5	TPU (Термопластичний поліуретан)	TPU – це гнучкий матеріал, що дає змогу виготовляти еластичні вироби. Його застосовують для створення предметів, які мають зберігати певний рівень гнучкості, наприклад чохлів для телефонів, взуття чи прокладок.
6	Нейлон	Нейлон є міцним і зносостійким матеріалом, який широко застосовується для виготовлення функціональних механічних деталей, зокрема шестерень та інструментів. Йому властива висока стійкість до тертя та здатність витримувати значні навантаження.

Розроблено авторами на підставі даних [18, 19]

Для виробництва металевих порошків використовують матеріали, що наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Матеріали виробництва металевих порошків

Матеріали	
Нержавіючу сталь	- аустенітні нержавіючі сталі; - дуплексні та спеціальні нержавіючі сталі; - феритні нержавіючі сталі; - мартенситні нержавіючі сталі.
Сплави	- кобальтові сплави; - мідні сплави; - титанові сплави; - нікелеві сплави; - суперсплави.
Інші матеріали	- інструментальні сталі; - швидкорізальні сталі; - низьколеговані сталі.

Металеві порошки, такі як сплави алюмінію та титану, виявилися відповідним варіантом для 3D-друку легких деталей з відмінним співвідношенням міцності та ваги.

Очікується, що зростаюча потреба у легких та складних компонентах стимулюватиме продаж металевих порошків для адитивного виробництва. Одним із прикладів суттєвого прогресу є поява технології розпилення. Розпорошення газом та водою є популярним методом отримання металевих порошків за рахунок швидкого затвердіння розплавленого металу.

Інновації у сфері виробництва та рециклінгу порошків допомагають підвищити ступінь екологічності та рентабельності адитивного виробництва. Ефективні системи відновлення та повторного використання порошку скорочують кількість відходів, вартість матеріалів та обмежують несприятливий вплив на навколишнє середовище.

В якості основної сировини використовується широкий спектр металів у вигляді порошкових гранул правильної сферичної форми. Це дозволяє використовувати майже всі стандартизовані сплави, комбінувати їх і розробляти спеціальні матеріали для конкретних застосувань. Аналіз стандартних металевих порошків, проведено авторами на підставі [19] та представлено в табл. 4.

Щодо технологій 3D друку, то на думку авторів сьогодні існує багато методик та технологій друку, найбільш поширеними з яких є наступні [20] табл. 5:

- Моделювання методом наплавлення (Fused deposition modeling, FDM);
- Лазерна стереолітографія (Laser stereolithography, SLA);
- Селективне лазерне спікання (Selective laser sintering, SLS).

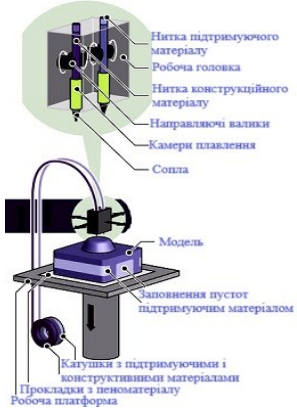
Таблиця 4 – Стандартні металеві порошки

Матеріал	Властивості	Основні сфери виробництва:	Галузі промисловості:
Алюміній AlSi10Mg	Легкий конструкційний сплав меншої щільності, ніж інші матеріали для 3D-друку. Виявляє хороші легуючі властивості, тепло- та електропровідність. Готові вироби, виготовлені на 3D-принтерах Alfa-150D і Alfa-280, демонструють однорідну структуру і практично повну відсутність пористості.	дужки трубопровідна арматура хвилеводів повітроводи теплообмінники аерокосмічний	аерокосмічний авіації автомобільний енергії
Титан Ti6Al4V	Високоміцний біосумісний конструкційний матеріал, що характеризується однорідною щільною структурою, особливо стійкий до корозії, а також, у поєднанні з хорошими механічними властивостями, має малу питому вагу – найпоширеніший матеріал для створення різноманітних виробів медичного призначення, а також виробів для аерокосмічної, авіаційної, машинобудівної, приладобудівної промисловості.	хірургічні інструменти та елементи для фіксації зламаних кісток частини літаків і космічних кораблів частини газотурбінних двигунів компоненти для автотранспорта	аерокосмічний авіації автомобільний енергії ліки стоматологія
Алюміній AlSi10Mg	Легкий конструкційний сплав меншої щільності, ніж інші матеріали для 3D-друку. Виявляє хороші легуючі властивості, тепло- та електропровідність. Готові вироби, виготовлені на 3D-принтерах Alfa-150D і Alfa-280, демонструють однорідну структуру і практично повну відсутність пористості.	дужки трубопровідна арматура хвилеводів повітроводи теплообмінники аерокосмічний	аерокосмічний авіації автомобільний енергії
Титан Ti6Al4V	Високоміцний біосумісний конструкційний матеріал, що характеризується однорідною щільною структурою, особливо стійкий до корозії, а також, у поєднанні з хорошими механічними властивостями, має малу питому вагу – найпоширеніший матеріал для створення різноманітних виробів медичного призначення, а також виробів для аерокосмічної, авіаційної, машинобудівної, приладобудівної.	частини літаків і космічних кораблів частини газотурбінних двигунів компоненти для автотранспорта та автоспорту	аерокосмічний авіації автомобільний енергії ліки
Кобальт-хром CoCrMo	Їдкий біосумісний матеріал. Завдяки високій твердості цей сплав використовується для виготовлення зубних протезів, протезів та імплантатів кульшового або колінного суглобів.	форсунки газових турбін прилади для контролю та вимірювання	аерокосмічний авіації енергії

Марка сталі AISI 316L	Сплав нержавіючої сталі AISI 316L є найпоширенішим матеріалом для 3D-друку, який використовується для виготовлення різноманітних виробів зі складною геометрією, з внутрішніми порожнинами та відповідними каналами охолодження. Застосовується для широкого спектру завдань у різних галузях промисловості, стійкий до корозії, демонструє досить високу міцність і витривалість.	двигун, машини та частини машин частини літаків і космічних кораблів компоненти для автотранспорту прилади для контролю, вимірювання та автоматизації	аерокосмічний авіації автомобільний енергії
Інконель 625	Придатний для дисперсійного зміцнення цей нікель-хромовий сплав з додаванням ніобію, який у поєднанні з молібденом забезпечує підвищену міцність без додаткової термічної обробки. Діапазон робочих температур жароміцного сплаву <i>Inconel 625</i> – від криогенних температур до 980°C. Сплав витримує агресивне корозійне середовище і особливо стійкий до точкової та щілинної корозії. Крім того, він стійкий до газової корозії при високих температурах, демонструє високу технологічність, у тому числі зварюваність.	теплозахисні екрани жаростійке футерування камер згоряння і пальників канали газотурбінних двигунів спеціальне обладнання морських платформ і морських суден	аерокосмічний авіації суднобудування енергії
Інконель 718	Нікель-хромовий сплав із значною кількістю заліза, ніобію та молібдену разом із меншою кількістю алюмінію та титану, придатний для дисперсійного зміцнення. Цей жаростійкий сплав поєднує в собі стійкість до корозії та високу міцність, відмінну зварюваність і стійкість до утворення після зварювальних тріщин. Сплав демонструє відмінну міцність при температурах до 700 °C і в даний час залишається важливим матеріалом для більшості компонентів авіаційних двигунів з робочою температурою нижче 650 °C.	частини двигунів і корпусів літаків/космічних кораблів прилади для контролю, вимірювання та автоматизації компоненти газових турбін насосні колеса для роботи при високих температурах	аерокосмічний авіації автомобільний енергії

Розроблено авторами на підставі [22]

Таблиця 5 – Найпоширеніші технології друку

Технології друку	Суть та властивості
<p data-bbox="124 264 775 297">Моделювання методом наплавлення (FDM)</p> 	<p data-bbox="798 264 1468 745">Найпоширеніша методика 3Д-друку. Проста та відносно дешева. Універсальна та вельми функціональна. Формування об'єкта при моделюванні методом наплавлення відбувається за рахунок пошарового нанесення на робочу платформу розплавленого матеріалу. Як матеріал для цих цілей застосовується пластик у формі нитки різної товщини. Також можуть застосовуватися різноманітні гнучкі матеріали та посилений/металізований пластик. Складні елементи, що нависають, друкуються з підтримками.</p>
<p data-bbox="124 745 775 817">Лазерна стереолітографія (Laser stereolithography, SLA)</p> 	<p data-bbox="798 745 1468 1368">Точність друку набагато вище, ніж може видати 3Д друк FDM, що призвело до її особливої популярності у певних сферах. 3Д друк SLA застосовується, зокрема, у ювелірній справі та стоматології завдяки високій деталізації виробів. Суть процесу друку полягає в тому, що ємність заповнюється рідким фотополімером, який шар за шаром опромінюється лазерним променем відповідно до контурів майбутнього об'єкта. Під дією випромінювання фотополімерна смола затвердіває, поступово утворюючи готовий виріб. Існує також різновид цього методу – 3Д-друк DLP, де замість лазера використовується спеціальний проектор. Такий підхід забезпечує значно вищу швидкість друку.</p>
<p data-bbox="124 1368 775 1406">Селективне лазерне спікання (SLS)</p> 	<p data-bbox="798 1368 1468 1993">Професійна технологія 3Д-друку, яка широко застосовується в промисловості. SLS вважається одним із найнадійніших методів 3Д-друку, який застосовується як для створення прототипів, так і для виготовлення повнофункціональних виробів. У цьому процесі використовуються спеціальні порошкові матеріали — пластикові або металеві. Лазерний промінь оплавляє порошок по контуру моделі, утворюючи перший шар. Далі поверхня знову засипається порошком, який повторно піддається лазерному опроміненню. Таким чином, об'єкт поступово формується пошарово. Особливістю SLS-друку є відсутність потреби в додаткових опорних структурах для утримання висячих елементів, що дозволяє зменшити витрату матеріалу.</p>

Джерело: розроблено авторами на основі [20,22])

Суднобудівна галузь прагне до підвищення ефективності та зниження витрат за рахунок впровадження АТ. Однак широке застосування 3D-друку обмежується проблемами шорсткості поверхні та точності розмірів, що впливає на механічні властивості та експлуатаційні характеристики деталей.

Шорсткість поверхні визначається параметрами Ra , Rz , $Rmax$, вимірюваними за допомогою профілометрів і 3D-сканерів. Найпоширенішими методами оцінювання є:

– Контактні методи: механічні профілометри, що дають змогу вимірювати нерівності з високою точністю.

– Безконтактні методи: лазерні та оптичні сканери, інтерферометрія.

– Методи комп'ютерного аналізу: 3D-сканування і порівняння з CAD-моделлю.

При проведенні аналізу, автори встановили, що якість поверхні і точність надрукованих деталей залежать від безлічі параметрів, серед яких можна виділити:

1. Технологію друку:

– FDM (Fused Deposition Modeling) – найпоширеніша, але дає високу шорсткість.

– SLA (Stereolithography) – забезпечує гладку поверхню, але потребує фотополімеризації.

– SLS (Selective Laser Sintering) – формує пористу структуру.

– DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – використовується для металевих деталей, але потребує постобробки.

2. Параметри друку:

– Висота шару: чим менший шар, тим краща якість.

– Швидкість друку: занадто висока швидкість збільшує ризик дефектів.

– Температурні режими: перегрів або брак енергії можуть призводити до нерівномірного спікання.

Для оцінки точності розмірів застосовуються координатно-вимірювальні машини (СММ) і цифрові вимірювальні системи.

Зарубіжні дослідження показують, що:

– зниження висоти шару до 50 мкм зменшує Ra на 30 – 50 %;

– багатопроменева лазерна обробка (в DMLS) знижує пористість на 20 – 40 %;

– контроль температурного режиму зменшує внутрішні напруги.

Найефективнішими методами зарубіжні дослідження визнають лазерну постобробку й електрохімічне полірування, оскільки вони дають змогу зменшити шорсткість до $Ra < 1$ мкм без значних змін геометрії.

Використання спеціальних покриттів, таких як нікелювання або керамічні покриття, значно покращує зносостійкість і знижує коефіцієнт тертя.

Аналіз досвіду провідних компаній показав, що застосування лазерного полірування в суднобудуванні та авіації знизило шорсткість деталей до $Ra = 0.4$ мкм – (GE Additive (США), а впровадження комбінованої постобробки (лазерна + електрохімічна) дало змогу досягти точності ± 0.05 мм – (Siemens (Німеччина)). Крім того, використання SLM і гальванопокриття збільшило термін служби деталей на 30 % – (Rolls-Royce (Великобританія)).

Міжнародні стандарти (ISO 25178, ASTM F42) [23] регламентують допуски за шорсткістю і точністю. Сучасні зарубіжні дослідження прагнуть до зниження шорсткості до $Ra < 1$ мкм і відхилень розмірів менше 0.1 мм.

Автори вважають доцільним, привести декілька прикладів використання 3D-друку в суднобудуванні [24]:

Перший в світі гребний гвинт, що надрукований на 3-D принтері (рис. 5) з нікель-алюміній-бронзового сплаву за допомогою дугового зварювання. Цей гвинт, надрукованим на 3D-принтері, отримав французький мінний тральщик *Andromède*.



Рисунок 5 – Перший в світі гребний гвинт, що зроблений на 3-D принтері
(джерело: [25])

Про це повідомляє компанія Naval Group [28]: «Це найбільший металевий 3D-друкований рушій, коли-небудь проводився у світі, і перший гвинт, отриманий в результаті цієї технології, був піднятий на борт військового корабля і виготовлений для використання не тільки для ходових випробувань».

НП Newport News Shipbuilding (США): успішно надруковано та встановлено великий клапанний колектор на авіаносці – демонстрація надійності технології для критичних елементів (рис. 6) Складання клапанного колектора, спеціалізована конструкція, що дозволяє розподіляти одне джерело рідини на кілька точок на кораблі, встановлена в насосній кімнаті авіаносця класу Gerald R. Ford Enterprise. Складання має довжину близько 5 футів і важить 1 000 фунтів. Newport News співпрацювала з DM3D Technology для виробництва корпусу колектора [26].

SEAD: 3D-друк цілих корпусів суден з HDPE (рис. 7, 8) [27].

В університеті американського штату Мэн вчені створили патрульний катер довжиною 25 футів і вагою близько 2,3 тони за 72 години (рис. 9). Він отримав назву 3Dirigo і вирушив на випробування в *Alford W2 Ocean Engineering Laboratory*. Принтер же, на якому вийшло надрукувати човен, дає змогу виготовляти об'єкти завдовжки до 30 метрів, завширшки 6,7 і заввишки 3 м зі швидкістю 227 кг матеріалу на годину.

Включення 3D-друку в існуючі виробничі та логістичні процеси (рис. 10). Надрукований стояк повернення масла для танкера TYSLA RoRo (рис. 11). Результат: Зниження ваги на 90 %, виробництво за 15 днів (замість 135!). Оптимізація: 10 деталей об'єднано в 1.



Рисунок 6 – Великий клапанний колектор
(джерело: [26])

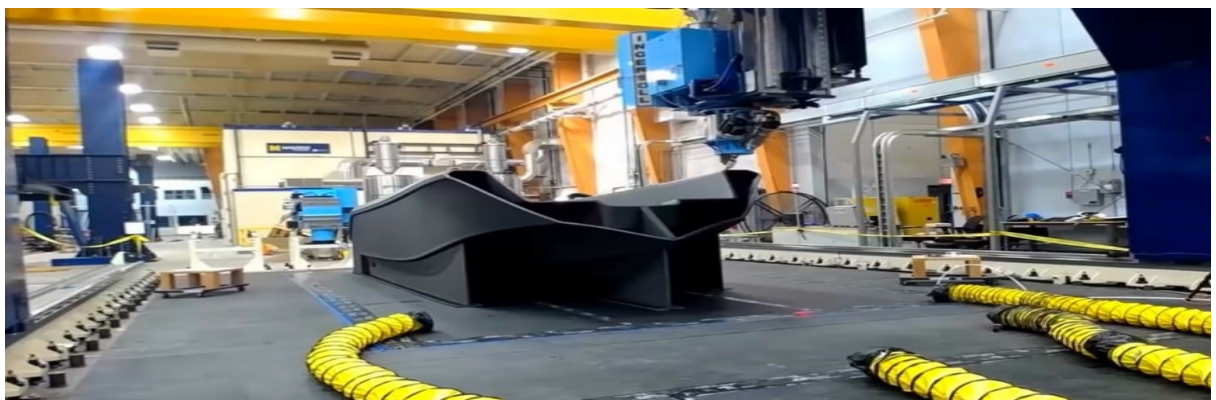


*Рисунок 7 – Корпус судна з HDPE
(джерело : [27])*



*Рисунок.8 – 3D-друк цілих корпусів суден з HDPE
(джерело : [28])*

Р



*Рисунок 9 – Патрульний катер
(джерело: [29])*

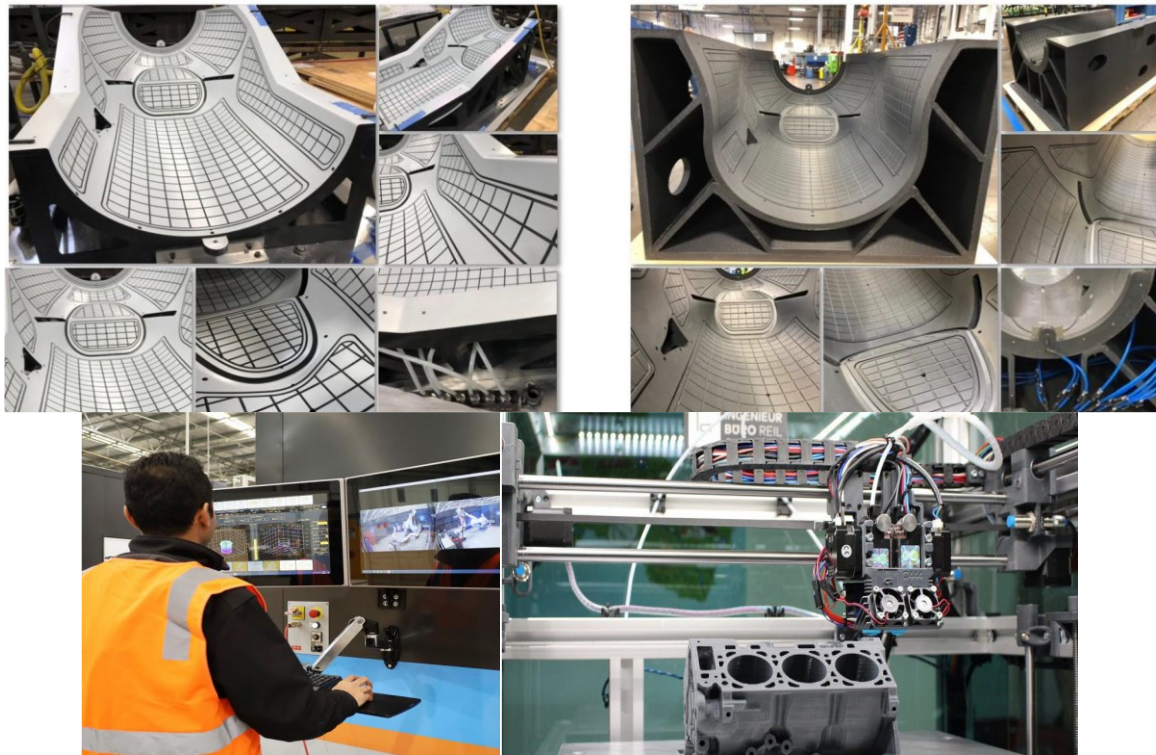


Рисунок 10 – Включення 3D-друку в існуючі виробничі та логістичні процеси



Рисунок.11 – Стояк повернення масла для танкера TYSLA RoRo
(джерело : [28])

Компанія *Pelagus 3D* успішно поставила виготовлений з використанням адитивних технологій стояк повернення масла для судна *TYSLA RoRo*. У морській та офшорній галузях відбувається зміна парадигми управління запасними частинами завдяки інтеграції адитивного виробництва. Цей проект, створений у результаті співпраці *Pelagus 3D*, *Kawasaki Heavy Industries* і *Wilhelmsen Ship Management*, підкреслює практичні переваги АМ у скороченні часу виконання замовлень і підвищенні продуктивності деталей [28].

Стояк, виготовлений з використанням селективного лазерного спікання (SLS) з нержавіючої сталі, є прикладом підвищення ефективності за рахунок АМ. Вагу деталі знижено на 90 %, що спрощує процеси монтажу і забезпечує безперебійність робіт з технічного обслуговування. Традиційні методи

виготовлення зайняли б 135 днів, тоді як АМ виконала завдання всього за 15 днів, що значно скоротило потенційний час простою судна.

Роль **Kawasaki Heavy Industries** як OEM-виробника була ключовою в оптимізації конструкції компонента, об'єднанні 10 деталей в одну АМ-деталь і підвищенні ефективності потоку. Ця інноваційна конструкція не тільки підвищує зручність роботи та безпеку, а й відповідає цілям сталого розвитку за рахунок мінімізації використання матеріалів.

ВМС США(USS Bataan): Уникнення дорогої ремонтної місії завдяки бортовому 3D-принтеру [30, 31].

Підвищення автономності суден.

Якщо ж говорити про інші сфери застосування 3D-технологій у суднобудуванні, то вони цілком застосовані і у виготовленні деталей інтер'єру. Внутрішнє оздоблення яхти часто хочеться зробити неповторним і втілити свої фантазії, і в цьому якраз і допоможе 3D-принтер, здатний з різних матеріалів «виліпити» необхідну річ.

Проведений аналіз дозволив вказати поточні сфери застосування 3D-друку в суднобудуванні та ремонті :

Виробництво компонентів:

3D-друк використовується для виготовлення широкого спектру компонентів, від невеликих складних деталей, таких як клапани та насоси, до великих елементів, таких як гребні гвинти і секції корпусів.

Суднобудівники можуть створювати нестандартні деталі складної геометрії, які важко чи неможливо виготовити традиційними методами.

Приклад: Підрозділ НІ **Newport News Shipbuilding** успішно надрукував на 3D-принтері і встановив великий вузол клапанного колектора на авіаносці, що будується. Його успішна установка свідчить про значний прогрес у визнанні та надійності деталей, надрукованих на 3D-принтері, для відповідальних морських застосувань. Це також вказує на потенційне зрушення у суднобудуванні у бік включення адитивного виробництва для основних структурних елементів.

Компанія **CEAD** займається 3D-друком цілих корпусів суден HDPE, демонструючи потенціал великоформатного адитивного виробництва.

3D-друк дозволяє виконувати запасні частини на вимогу, скорочуючи час простою, особливо у віддалених місцях.

Цифрові файли деталей можуть бути надіслані на принтери на борту судна або до найближчих центрів для швидкого виробництва.

Приклад: ВМС США на борту USS Bataan уникла великої ремонтної місії завдяки 3D-принтеру, що підкреслює потенціал підвищення автономності суден та зниження залежності від традиційних ланцюжків поставок для ремонту. Це вказує на можливість виготовлення критично важливих деталей у морі усуває необхідність потенційно тривалих і дорогих заходів у порт, значно підвищуючи експлуатаційну готовність і знижуючи логістичне тягар. Це також вказує на майбутнє, в якому суди можуть бути самодостатніми у вирішенні питань технічного обслуговування [30, 31].

Консорціум порту Роттердам вивчає можливість 3D-друку різних функціональних запасних частин. Це вказує на те, що великі порти визнають стратегічну значущість 3D-друку для підтримки морських операцій.

Створення можливостей 3D-друку в портовій інфраструктурі може значно знизити затримки та витрати, пов'язані з отриманням необхідних деталей для суден, що робить порти більш привабливими та ефективними центрами морської діяльності. Очікується, що більше 50 000 унікальних запасних частин будуть оцифровані для виробництва на вимогу.

Це показує масштабні зусилля створення всеосяжної цифрової бази даних для морських запасних частин.

Отже, оцифрування запасних частин є найважливішим кроком на шляху до повної реалізації потенціалу 3D-друку на вимогу, забезпечуючи швидке та ефективне виробництво за потреби. Це вимагає співробітництва у галузі розробки стандартизованих цифрових моделей і забезпечення сумісності.

На думку авторів, переваги 3D-друку в морській галузі очевидні (рис. 12) [32, 33, 34]:

1. Оптимізація витрат.

Менше витрат на обладнання, матеріали та робочу силу.

Для кожного бізнесу ключовим завданням є зниження витрат. Однією з переваг 3D-друку є те, що експлуатаційні витрати, витрати на робочу силу та матеріали в цілому суттєво нижчі, ніж у випадку з великомасштабним виробництвом.

– *Вартість машини*

Витрати на експлуатацію обладнання становлять незначну частину загальної вартості виробничого процесу. Хоча енергоспоживання під час виготовлення деталей у промислових умовах може бути досить дорогим, можливість створення складних виробів за один технологічний цикл забезпечує вищу ефективність і суттєву економію часу. Таким чином, витрати на роботу машин компенсуються за рахунок переваг швидкості виробництва.

– *Витрати на оплату праці*

Однією з переваг 3D-друку є низькі трудові витрати. На відміну від традиційного виробництва, де для роботи на кількох різних машинах потрібні спеціалісти або для повного складання виробу необхідна виробнича лінія, у випадку з 3D-принтером достатньо оператора, який запускає механізм і контролює автоматизований процес друку завантаженої моделі. Відтак витрати на робочу силу є значно меншими порівняно з класичними виробничими підходами..

– *Матеріальні витрати*

Кількість матеріалів, доступних для 3D-принтерів, постійно зростає, і в останні роки це дало змогу ще ефективніше оптимізувати кінцеву собівартість готової продукції.

– *Менше транспортних витрат*

Однією з ключових переваг 3D-друку є скорочення відстаней, які необхідно долати продукту. Оскільки принтер здатний виготовити виріб повністю від початку до кінця, дизайн може бути створений в одній країні та переданий електронною поштою в іншу для виробництва. Це усуває потребу у виготовленні фізичних прототипів і їх транспортуванні між заводами для завершення процесу. Завдяки цьому 3D-друк стає глобальною технологією, яку можна реалізовувати в будь-якій точці світу без додаткових логістичних витрат, що, своєю чергою, зменшує обсяги морських, повітряних і автомобільних перевезень.

2. Більш швидке та економічне виробництво, менше відходів:

– 3D-друк дає змогу створювати складні морські деталі та компоненти за менший час порівняно з традиційними методами виробництва.

– Це значно скорочує відходи матеріалу й усуває необхідність у дорогих формах або інструментах.

– Тепер виробники можуть виробляти індивідуальні деталі за запитом, зводячи до мінімуму витрати на зберігання і проблеми з управлінням запасами.

– Під час проєктування дизайнери мають орієнтуватися на ефективність. Традиційні методи виготовлення багатьох деталей і виробів передбачають велику кількість окремих етапів, кожен із яких може стати джерелом помилки та потребувати повторного запуску, що ускладнює весь виробничий процес. Натомість одноетапне виробництво, яке забезпечує 3D-друк, є значно вигіднішим і надійнішим.

– Традиційне виробництво здебільшого є віднімальним процесом, коли значна частина сировини втрачається та потребує повторного використання, що зумовлює високі витрати й утворення відходів. Натомість 3D-друк має перевагу завдяки адитивному підходу, за якого продукт формується з мінімальними втратами матеріалу. Якщо традиційні методи неминуче створюють відходи, які ще треба переробити або повторно застосувати, витрачаючи додатковий час і ресурси, то 3D-принтери великого формату забезпечують цей процес автоматично, значно підвищуючи ефективність.

– Термопластичні матеріали можна багаторазово розплавляти й охолоджувати, знову надаючи їм твердої форми. Завдяки цій властивості виробничі відходи легко піддаються повторному використанню.

3. Підвищена гнучкість дизайну та зменшення кількості помилок:

– Морські дизайнери та інженери можуть розкрити свій творчий потенціал за допомогою 3D-друку, оскільки він дає змогу створювати складні геометричні форми і складні деталі, які раніше було складно реалізувати.

– Прототипування стає ефективним і економічним, що дає змогу швидко виконувати ітерації та покращувати дизайн.

4. Наявність запчастин і технічне обслуговування:

– 3D-друк полегшує виробництво запасних частин для кораблів і суден, скорочуючи час простою і потребу у великих запасах.

– Проблеми, пов'язані із застарілими або важкодоступними компонентами, можна вирішити, забезпечивши безперебійну роботу.

5. Виробництво на замовлення:

– Важливою перевагою є можливість виготовляти деталі та вироби значно швидше, ніж за традиційних методів. Складні проекти можна створити у вигляді САПР-моделі й перетворити на готовий об'єкт усього за кілька годин. Це дає змогу швидко перевіряти та доопрацьовувати дизайнерські ідеї. У той час як класичні технології потребують тижнів або навіть місяців, щоб пройти шлях від проектування до прототипу й виробництва, 3D-друк істотно скорочує цей цикл.

– Морські компанії можуть друкувати необхідні деталі та компоненти за запитом, усуваючи необхідність у тривалих термінах поставки або дорогих міжнародних перевезеннях.

– Аварійним ремонтом можна ефективно управляти за допомогою можливостей 3D-друку на борту суден.

6. Різноманітність матеріалів і сумісність:

– 3D-друк дає змогу використовувати різні матеріали, включно з металами, полімерами та композитами, залежно від конкретних вимог морського застосування.

– Сумісність матеріалів із суворими морськими умовами є важливим аспектом, що забезпечує міцність і довговічність друкованих деталей.

7. Можливість віддаленого друку:

– Віддалений моніторинг і управління 3D-принтерами дають змогу морським компаніям використовувати досвід фахівців, навіть якщо вони географічно розділені.

– Компанії в районах, що не мають виходу до моря, можуть отримати вигоду з технологій 3D-друку без необхідності в спеціалізованих виробничих потужностях поблизу узбережжя.

Майбутнє управління ланцюгами поставок морської галузі схиляється до цифровізації та виробництва на вимогу. Завдяки цифровим запасам і можливостям швидкого виробництва галузь стане свідком скорочення часу реагування та економічної ефективності під час пошуку запасних частин, особливо тих, які важко знайти або які більше не виробляються.

8. Конкурентна перевага:

– Підприємства отримують можливість створювати якісніші, вдосконалені вироби у значно коротші терміни, що забезпечує їм конкурентні переваги. Завдяки цьому процес розробки продукту розпочинається раніше: прототипи виготовляються швидше, а отже, виріб оперативніше переходить у виробничу стадію та виходить на ринок. Це знижує ризики втрати інформації на різних етапах комунікації, які можуть призвести до серйозних проблем. Фізичний прототип дозволяє ефективно презентувати ідею партнерам, інвесторам та клієнтам, формуючи спільне розуміння майбутнього продукту.

– Суттєвою перевагою 3D-друку є можливість швидко створювати концепт, який можна побачити й потримати в руках, що усуває сумніви чи непорозуміння. Навіть якщо це лише прототип, він дає набагато точніше уявлення про кінцевий результат, ніж будь-який опис чи креслення.

Для визначення перспективності моделі за традиційних методів потрібні масштабні дослідження. Натомість 3D-друк дозволяє оперативно отримати відгуки потенційних покупців та інвесторів. Виріб можна коригувати аж до завершального етапу, чого не дають класичні технології. Це робить 3D-друк унікальним та ефективним інструментом для оцінки ринкового потенціалу й підвищення шансів на успішний комерційний старт. [34].

9. Конфіденційність:

Безперервне прототипування та виробництво за допомогою власного 3D-принтера забезпечує збереження проектів у межах компанії, що гарантує захист інтелектуальної власності. Жодна стороння організація не матиме доступу до ваших розробок і не зможе претендувати на них. Усі інноваційні рішення залишаються всередині підприємства, тож питання конфіденційності повністю знімається.

Отже, 3D-друк в морській галузі має великий потенціал для різноманітних застосувань, починаючи від створення прототипів та закінчуючи виробництвом складних деталей і обладнання:

Заміна лиття:

3D-друк, зокрема технологія SLS, може бути використана для створення міцних та точних деталей, які раніше виготовлялися за допомогою лиття, але з меншими витратами та швидше, особливо для малих партій.

Створення складних геометричних форм:

3D-друк дозволяє створювати деталі з внутрішніми каналами, решітчастими структурами та іншими складними елементами, які неможливо або важко виготовити традиційними методами.

Виготовлення прототипів:

3D-друк дозволяє швидко та дешево створювати прототипи для тестування нових конструкцій та обладнання, що значно прискорює процес розробки.

Виробництво запасних частин:

3D-друк може використовуватися для виготовлення запасних частин для суден та іншого морського обладнання, особливо для рідкісних або застарілих моделей, що дозволяє зменшити час простою та витрати на ремонт.

Виготовлення обладнання для підводних робіт:

3D-друк може бути використаний для створення спеціалізованого обладнання для підводних робіт, такого як інструменти, камери та інші пристрої.

10. Інші застосування:

Виготовлення моделей кораблів та морських об'єктів:

3D-друк може бути використаний для створення детальних моделей кораблів, морських платформ, портів та іншого обладнання для навчання, візуалізації та презентацій.

Створення індивідуальних інтер'єрів суден:

3D-друк дозволяє створювати унікальні та індивідуальні елементи інтер'єру для суден, наприклад, декоративні панелі, меблі та інші елементи, що покращують комфорт та естетичний вигляд.

Дослідження та розробки:

3D-друк може бути використаний для дослідження та розробки нових матеріалів та технологій для морської галузі.

Автори статті вважають, що основними перевагами 3D-друку в морській галузі є:

Зменшення витрат на виробництво:

3D-друк дозволяє знизити витрати на виготовлення прототипів та деталей, особливо в малих партіях.

Скорочення часу виробництва:

3D-друк дозволяє значно скоротити час на виготовлення деталей та обладнання, що прискорює процес розробки та ремонту.

Можливість створення складних геометричних форм:

3D-друк дозволяє створювати деталі з складними геометричними формами, які неможливо або важко виготовити традиційними методами.

Збільшення гнучкості виробництва:

3D-друк дозволяє швидко змінювати конструкції та виробляти деталі на замовлення, що збільшує гнучкість виробництва.

Доступність запасних частин:

3D-друк може застосовуватися для виготовлення запасних частин до рідкісних або застарілих моделей обладнання, що дозволяє скоротити час простою та знизити витрати на ремонт.

Втім, поряд із беззаперечними перевагами впровадження адитивних технологій у промисловість існують і чинники, що стримують цей процес. Згідно з опитуванням експертів у сфері 3D-друку, проведеним у 2019 році компанією Dimensional Research на замовлення Essentium, основними проблемами залишаються висока вартість обладнання й матеріалів, складність масштабування результатів та недостатній рівень довіри до технології. (рис. 13).



Рисунок 13 – Основні проблеми впровадження АТ в серійне виробництво (джерело: розроблено авторами на основі даних [35])

Автори статті, підкреслюють, що до цих проблем впровадження АТ в виробництво треба додати:

- початкові витрати на принтер;
- 3D-друкований об'єкт здебільшого вимагає деякої постобробки;
- час друку;
- для роботи з 3D-моделями потрібні спеціальні навички;
- скорочення та втрата робочих місць у виробництві.

Усунення цих проблем є важливим для розширення використання 3D-друку в суднобудівництві та в різних галузях виробництва, для підвищення його ефективності та надійності.

Стосовно України, автори статті підкреслюють, що в Україні 3D-друк активно розвивається у різних галузях, зокрема у морській. Особливо актуальним 3D-друк є у виробництві дронів та іншого обладнання для морських операцій, де швидкість та індивідуалізація виробництва мають критичне значення.

Застосування 3D-друку в морській галузі України:

1. Прототипування та виробництво деталей (дозволяє швидко створювати прототипи морського обладнання, що значно прискорює процес розробки та випробувань. Крім того, він використовується для виробництва дрібних, але важливих деталей, які можуть бути важкодоступними або дорогими у традиційному виробництві).

2. Виробництво дронів (для створення корпусів, лопатей та інших компонентів дронів, які використовуються для розвідки, моніторингу та інших морських операцій). Найбільш відомі українські морські дрони – Sea Baby, MAGURA V5, та «Марічка» (рис. 14, 15, 16). Ці дрони мають різні характеристики, але всі вони призначені для ураження ворожих цілей, таких як кораблі та інфраструктурні об'єкти.

Враховуючи досвід України у використанні дронів у військових цілях, 3D-друк стає важливим інструментом для забезпечення потреб армії. [36].

3. Створення індивідуальних інструментів та обладнання. Унікальні інструменти та обладнання, адаптовані під конкретні потреби морських операцій, що підвищує ефективність та безпеку роботи.

4. Ремонт та обслуговування. Для швидкого виготовлення запасних частин для морського обладнання, що зменшує час простою та витрати на ремонт.



Рисунок 14 – Фото: морської дрон Sea Baby
(джерело: [37])



Рисунок 15 – Українській дрон Magura V5
(джерело: фото [38])



Рисунок 16 – Підводний безпілотник «Марічка»
(джерело: [39]).

Висновки.

1. Трансформували підхід підприємств до виготовлення продукції, дозволяючи випускати саме ті вироби, які потрібні замовнику. Очікування споживачів також змінилися, адже тепер вони отримують товари значно швидше та ефективніше. Галузь 3D-друку є однією з найбільш динамічних і має потужний потенціал для подальшого розвитку.

2. Сьогодні дедалі більше промислових секторів починають інтегрувати технології 3D-друку у свої виробничі процеси, що свідчить про зростання їхнього значення для сучасної індустрії.

3. Унікальність 3D-друку полягає у здатності створювати складні геометричні форми та взаємопов'язані елементи без додаткової збірки. Це дає можливість виготовляти невеликі, але складні вироби з мінімальними витратами ресурсів та у стислі терміни.

4. Важливою перевагою є здатність розробляти та виробляти об'єкти найрізноманітніших форм без залучення спеціальних інструментів. Це забезпечує підприємствам вищий рівень гнучкості під час виробництва і дозволяє значно зменшити витрати.

5. Технологія 3D-друку активно стимулює розвиток інновацій і чудово підходить для індивідуалізованого налаштування продукції за потребою. Вона відкриває перед підприємствами можливості створювати вироби новими способами, практично без обмежень для уяви. Крім того, технологія здатна відновлювати застарілі конструкції, що є особливо цінним для галузей, де виробництво деталей уже припинене.

6. Використання 3D-друку на борту морських суден може суттєво змінити парадигму технічного обслуговування систем безпеки, підвищуючи оперативність, автономність і адаптивність морських операцій.

7. Адитивні технології демонструють стабільне зростання у світовому суднобудуванні та поступово переходять від прототипування до серійного виробництва критичних компонентів.

8. Найбільш перспективними напрямками в суднобудуванні є виготовлення корпусних конструкцій, гребних гвинтів та запасних частин на вимогу.

9. Основними бар'єрами впровадження є відсутність нормативної бази, стандартизації матеріалів і кваліфікованих кадрів.

10. Україна має значний потенціал розвитку адитивних технологій у суднобудуванні, але він потребує державної підтримки, створення нормативної бази та інвестицій у наукові дослідження.

11. Подальші наукові дослідження мають бути спрямовані на розвиток адитивних матеріалів, створення стандартів виробництва та тестування, а також на інтеграцію цифрових технологій моделювання та друку в загальну інфраструктуру.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку // Наука, технології, інновації. – 2017. – № 1. – С. 68–77.
2. Buswell R. A., Soar R. C., Pendlbury M., Gibb A. G., Edum-Fowte F. T., Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction // Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC). – Rotterdam, The Netherlands, 2005. – P. 141–150. – Режим доступу: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144>
3. Delgado D., Clayton P., O'Brien W. J., Seeper-sad C., Juenger M., Ferron R., Salamone S. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review // Automation in Construction. – 2018. – № 89. – P. 110–119. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301620>
4. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 141(9). – P. 1–13.
5. Sartipi F., Sartipi A. Brief review on advancements in construction additive manufacturing // Journal of Construction Materials. – 2020. – № 1. – P. 2–4.
6. Андрійчук О. В., Оласюк П. Я. Застосування 3D-технологій у будівництві // Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. – 2015. – Вип. 3. – С. 11–18.
7. Петришина А. А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього // Актуальні задачі сучасних технологій: матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів (25–26 листопада 2015 р.). – Тернопіль, 2015. – С. 26–27.
8. Струтинська О. В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування // Наук. часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2: Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2018. – № 20. – С. 88–94.
9. Згалат-Лозинська Л. О., Згалат-Лозинський О. Б. Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D-друку у будівництві // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління. – 2020. – Т. 31 (70), № 5. – С. 45–51.

10. Шинський І. О., Дорошенко В. С. 3D-технології при литті по газифікованих моделях // Метал та лиття України. – 2009. – № 4–5. – С. 30–33.
11. Дорошенко В. С. Приклади 3D-технології в ливарному виробництві. Зниження металоємності виливків // Лиття та металургія. – 2016. – № 1. – С. 34–39.
12. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с. – ISBN 978-966-641-824-4.
13. Дорошенко В. С. Стан і тенденції розвитку ринку 3D-технологій як елементу цифровізації виробництва продукції з полімерів і металів // Світогляд. – 2021. – № 6 (92). – С. 44–48.
14. Exponential technologies in manufacturing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.x-t.ai/>
15. Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://namic.sg>
16. Wohlers T. Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual worldwide progress report. – Wohlers Associates, 2014. – 276 p.
17. Global Additive Manufacturing Market – Industry Size, Share, Trends and Forecast to 2032. – Data Bridge Market Research [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-additive-manufacturing-market>
18. Ахновська І., Брацлавець О. Розвиток світового ринку адитивних технологій в умовах техноглобалізму // Цифрова економіка та економічна безпека. – 2022. – № 1 (01). – С. 36–42. – DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.1-6>
19. Прогноз розвитку ринку порошків для 3D-друку до 2031 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.prometall.info/analitika/prognoz_razvitiya_rynka_poroshkov_dlya_3d_pechati_do_2031_goda
20. Як працює 3D-принтер: принципи, матеріали та технології [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://easy3dprint.com.ua/ru/kak-rabotaet-3d-printer/>
21. Data Bridge Market Research Market Analysis Study 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.databridgemarketresearch.com/>
22. Технології 3D друку і у чому вони заключаються [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/ru/tekhnologii-3d-pechati/>
23. BS EN ISO 25178-2. – DIN Media, 2022-02-04 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dinmedia.de>
24. Як 3D-технології використовують в суднобудуванні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arcadia.com.ua/kak-3d-tehnologii-ispolzuyut-v-sudostroenii>
25. У Франції створили гвинт за допомогою 3D-принтера [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://military.com/uk/news/u-frantsiyi-stvoryly-gvynt-za-dopomogoyu-3d-pryntera/>
26. Newport News Shipbuilding напечатал первый коллектор для авианосца USS Enterprise [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sea-man.org/news/3d-pechat-kollektor.html>
27. 3D-друк більших та міцніших човнів: морський центр застосувань (MAC) CEAD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ceadgroup.com/maritime-application-center-mac/>
28. Американці друкують деталі кораблів на принтерах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.originalam.net/articles/3d-detali-korablej.html>
29. В США на 3D-принтері надрукували 8-метровий катер [Електронний ресурс] // ЦТС з посиланням на Seanews. – 2019. – Режим доступу: https://cfts.org.ua/news/2019/10/21/v_ssha_na_3d_printere_napechatali_8_metrovyi_kater_video_55823
30. На військових кораблях будуть друкувати запчастини на 3D-принтері: як таке взагалі можливо [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://focus.ua/digital/559210-na-voennyh-korablyah-budut-pechatat-zapchasti-na-3d-printere>
31. 3D-друк використовується для оптимізації поставок морських запасних частин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dprint.fidller.com/2023/11/16/3d-pechat-ispolzuyetsya-dlya-optimizatsii-postavok-morskikh-zapasnykh-chastej/>
32. Роль 3D-друку в інновації морської галузі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.smart.md/ru/the-role-of-3d-printing-in-maritime-industry-innovations>
33. Кумунц Д. А., Пізінцалі Л. В. Аналіз розвитку 3D-друку в суднобудівній галузі // Проблеми і перспективи сталого розвитку транспорту : тези доповідей XIII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених (24 квітня 2025 р.). – Одеса : ОНМУ, 2025. – Ч. 1. – С. 23–29.
34. 3D-друк: плюси, мінуси та його роль в сучасному світі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fialan.ua/ua/news/vagno-znat/3d-druck-ta-biznes/>
35. Dimensional Research, 2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dimensionalresearch.com/>

36. Морські дрони, водневий двигун, революція у 3D друку металом, Arm vs Qualcomm та роботизовані шорти [Відео] // YouTube [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=rATVmlK9j0g>
37. Служба безпеки України. Офіційний телеграм-канал [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://t.me/SBUkr>
38. УНІАН. Інформаційне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.unian.net/>
39. Українські національні новини (УНН) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unn.ua/>.

REFERENCES

1. Androshchuk H.O. Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D-druku [Additive technologies: Prospects and problems of 3D printing], Nauka, tekhnolohii, innovatsii, No. 1, pp. 68–77, 2017. (Ukr.)
2. Buswell R.A., Soar R.C., Pendlebury M., Gibb A.G., Edum-Fowte F.T., Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction, Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC), Rotterdam, The Netherlands, pp. 141–150, 2005. Available at: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (Eng.)
3. Delgado D., Clayton P., O'Brien W.J., Seeper-sad C., Juenger M., Ferron R., Salamone S. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review, Automation in Construction, No. 89, pp. 110–119, 2018. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301620> (Eng.)
4. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods, Additive Manufacturing, Vol. 141(9), pp. 1–13, 2019. (Eng.)
5. Sartipi F., Sartipi A. Brief review on advancements in construction additive manufacturing, Journal of Construction Materials, No. 1, pp. 2–4, 2020. (Eng.)
6. Andriichuk O.V., Olasiuk P.Ya. Zastosuvannia 3D-tekhnolohii u budivnytstvi [Application of 3D technologies in construction], Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunku v budivnytstvi, Issue 3, pp. 11–18, 2015. (Ukr.)
7. Petryshyna A.A. Tendentsii rozvytku tryvymirnogo druku, obladnannia ta materialiv dlia noho [Trends in the development of 3D printing, equipment and materials], Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii: materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv (Ternopil, 25–26 November 2015), pp. 26–27, 2015. (Ukr.)
8. Strutynska O.V. Suchasnyi stan i perspektyvy rozvytku tekhnolohii tryvymirnogo modeliuvannia ta drukuvannia [Current state and prospects of 3D modeling and printing technologies], Naukovyi chasopys NPU imeni M.P. Drahomanova. Serii 2: Kompiuterno-orientovani systemy navchannia, No. 20, pp. 88–94, 2018. (Ukr.)
9. Zhalat-Lozynska L.O., Zhalat-Lozynskyi O.B. Rozvytok ta vprovadzhennia innovatsiinykh tekhnolohii 3D-druku u budivnytstvi [Development and implementation of innovative 3D printing technologies in construction], Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Ekonomika i upravlinnia, Vol. 31(70), No. 5, pp. 45–51, 2020. (Ukr.)
10. Shynskyi I.O., Doroshenko V.S. 3D-tekhnolohii pry litti po hazifikovanykh modeliakh [3D technologies in casting on gasified models], Metal ta littia Ukrainy, No. 4–5, pp. 30–33, 2009. (Ukr.)
11. Doroshenko V.S. Pryklady 3D-tekhnolohii v lyvarnomu vyrobnytstvi. Znizhennia metaloiemnosti vylivkiv [Examples of 3D technology in foundry production: Reducing metal consumption of castings], Lyttia ta metaluriia, No. 1, pp. 34–39, 2016. (Ukr.)
12. Manzhilevskyi O.D., Iskovych-Lototskyi R.D. Suchasni adytyvni tekhnolohii 3D druku. Osoblyvosti praktychnoho zastosuvannia [Modern additive 3D printing technologies: Features of practical application], Vinnytsia: VNTU, 105 p., 2021. ISBN 978-966-641-824-4. (Ukr.)
13. Doroshenko V.S. Stan i tendentsii rozvytku rynku 3D-tekhnolohii yak elementu tsyfrovizatsii vyrobnytstva produktsii z polymeriv i metaliv [State and trends in the development of the 3D technology market as an element of digitalization of polymer and metal products manufacturing], Svitohliad, No. 6(92), pp. 44–48, 2021. (Ukr.)
14. Exponential technologies in manufacturing [Electronic resource]. Available at: <https://www.x-t.ai/> (Eng.)
15. Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025 [Electronic resource]. Available at: <http://namic.sg> (Eng.)
16. Wohlers T. Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual worldwide progress report, Wohlers Associates, 276 p., 2014. (Eng.)
17. Global Additive Manufacturing Market – Industry Size, Share, Trends and Forecast to 2032 [Electronic resource], Data Bridge Market Research. Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-additive-manufacturing-market> (Eng.)

18. Akhnovska I., Bratslavets O. Rozvytok svitovoho rynku adytyvnykh tekhnolohii v umovakh tekhnogloballyzmu [Development of the global additive technology market in the conditions of technoglobalism], *Tsifrova ekonomika ta ekonomichna bezpeka*, No. 1(01), pp. 36–42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.1-6>. (Ukr.)
19. Prohnoz rozvytku rynku poroshkov dlia 3D-druku do 2031 roku [Forecast of the development of the 3D printing powders market until 2031] [Electronic resource]. Available at: https://www.prometall.info/analitika/prognoz_razvitiya_rynka_poroshkov_dlya_3d_pechati_do_2031_goda (Ukr.)
20. Yak pratsiuie 3D-printer: pryntsyipy, materialy ta tekhnolohii [How a 3D printer works: Principles, materials and technologies] [Electronic resource]. Available at: <https://easy3dprint.com.ua/ru/kak-rabotaet-3d-printer/> (Ukr.)
21. Data Bridge Market Research Market Analysis Study 2023 [Electronic resource]. Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/> (Eng.)
22. Tekhnolohii 3D druku i u chomu vony zakliuchaiutsia [3D printing technologies and what they are] [Electronic resource]. Available at: <https://3ddevice.com.ua/ru/tekhnologii-3d-pechati/> (Ukr.)
23. BS EN ISO 25178-2, DIN Media, 2022-02-04 [Electronic resource]. Available at: <https://www.dinmedia.de> (Eng.)
24. Yak 3D-tekhnolohii vykorystovuiut v sudnobudivnytstvi [How 3D technologies are used in shipbuilding] [Electronic resource]. Available at: <https://arcadia.com.ua/kak-3d-tehnologii-ispolzuyut-v-sudostroenii> (Ukr.)
25. U Frantsii stvoryly hvynt za dopomohoiu 3D-printera [A propeller was created in France using a 3D printer] [Electronic resource]. Available at: <https://military.com/uk/news/u-frantsiyi-stvoryly-gvynt-za-dopomogoyu-3d-pryntera/> (Ukr.)
26. Newport News Shipbuilding napiechatav pershyi kollektor dlia aviainostsia USS Enterprise [Newport News Shipbuilding printed the first manifold for the aircraft carrier USS Enterprise] [Electronic resource]. Available at: <https://seaman.org/news/3d-pechat-kollektor.html> (Eng.)
27. 3D-druk bilshykh ta mitsnishykh chovniv: Morskyi tsentr zastosovan (MAC) CEAD [3D printing of larger and stronger boats: Maritime Application Center (MAC) CEAD] [Electronic resource]. Available at: <https://ceadgroup.com/maritime-application-center-mac/> (Eng.)
28. Amerykantsi drukuiut detali korabliv na printerakh [Americans print ship parts on printers] [Electronic resource]. Available at: <https://www.originalam.net/articles/3d-detali-korablej.html> (Ukr.)
29. V SSHA na 3D-printeri nadrukuvaly 8-metrovyi kater [An 8-meter boat was 3D printed in the USA] [Electronic resource] // CTS z posylanniam na Seanews, 2019. Available at: https://cfts.org.ua/news/2019/10/21/v_ssha_na_3d_printere_napechatali_8_metrovyy_kater_video_55823 (Ukr.)
30. Na viiskovykh korabliakh budut drukuvaty zapchastyny na 3D-printeri: yak take vzhali mozhlyvo [Spare parts will be printed on 3D printers on warships: How is this possible] [Electronic resource]. Available at: <https://focus.ua/digital/559210-na-voennyh-korablyah-budut-pechatat-zapchasti-na-3d-printere> (Ukr.)
31. 3D-druk vykorystovuietsia dlia optymizatsii postavok morskikh zapasnykh chastei [3D printing is used to optimize the supply of marine spare parts] [Electronic resource], 16 November 2023. Available at: https://3dprint.fidller.com/2023/11/16/3d-pechat_ispolzuyetsya-dlya-optimizatsii-postavok-morskikh-zapasnykh-chastei/ (Eng.)
32. Rol 3D-druku v innovatsii morskoi haluzi [The role of 3D printing in maritime industry innovations] [Electronic resource]. Available at: <https://www.smart.md/ru/the-role-of-3d-printing-in-maritime-industry-innovations> (Eng.)
33. Kumunts D.A., Pizintsali L.V. Analiz rozvytku 3D-druku v sudnobudivnii haluzi [Analysis of the development of 3D printing in the shipbuilding industry], *Tezy dopovidei XIII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv ta molodykh vchenykh “Problemy i perspektyvy staloho rozvytku transportu”* (Odessa, 24 April 2025), Part 1, pp. 23–29, 2025. (Ukr.)
34. 3D-druk: pliusy, minusy ta ioho rol v suchasnomu sviti [3D printing: Pros, cons and its role in the modern world] [Electronic resource]. Available at: <https://fialan.ua/ua/news/vagno-znat/3d-druck-ta-biznes/> (Ukr.)
35. Dimensional Research, 2019 [Electronic resource]. Available at: <https://www.dimensionalresearch.com/> (Eng.)
36. Morski drony, vodnevyyi dvygun, revoliutsiia u 3D-druku metalom, Arm vs Qualcomm ta robotyzovani shorts [Maritime drones, hydrogen engine, revolution in 3D metal printing, Arm vs Qualcomm and robotic shorts] [Video] [Electronic resource]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=rATVmlK9j0g> (Eng.)
37. Sluzhba bezpeky Ukrainy. Ofitsiynyi Telegram-kanal [Security Service of Ukraine. Official Telegram channel] [Electronic resource]. Available at: <https://t.me/SBUkr> (Ukr.)
38. UNIAN. Informatsiine ahentstvo [UNIAN. Information agency] [Electronic resource]. Available at: <https://www.unian.net/> (Ukr.)
39. Ukrainski natsionalni novyny (UNN) [Ukrainian National News (UNN)] [Electronic resource]. Available at: <https://unn.ua/> (Ukr.)

Rossomakha O., Pizintsali L., Rossomakha O., Aleksandrovska N.

**ADDITIVE TECHNOLOGIES IN SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR:
WORLD EXPERIENCE AND PROSPECTS OF IMPLEMENTATION IN UKRAINE**

The article discusses the current state and prospects of additive technologies in global shipbuilding. It shows that 3D printing is gradually moving from prototyping to the manufacture of full-fledged structural elements, including hull parts, propellers and spare parts. The international experience of leading companies (Naval Group, Newport News Shipbuilding, CEAD) in the application of additive technologies is analysed, as well as the dynamics of the global market, which is forecast to grow from \$91.84 billion in 2024 to \$419.22 billion in 2032. The key factors hindering the widespread introduction of 3D printing in the shipbuilding industry have been identified: the lack of a developed regulatory framework, standardisation and certification of materials, a limited number of qualified personnel and the high cost of equipment. The paper systematises information on the types of materials used in shipbuilding (aluminium, titanium and polymer alloys) and describes their advantages and limitations. Emphasis is placed on the prospects for the introduction of additive technologies in Ukraine, which has significant potential for development but lags significantly behind the world's leading players. The scientific novelty of the article lies in the comprehensive generalisation of international experience in the use of 3D printing specifically in the maritime industry, whereas most previous studies have focused on construction and aviation. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using them to develop a national strategy for the integration of additive technologies into the shipbuilding industry of Ukraine, the creation of industry standards and training programmes for specialists. It is concluded that the active introduction of 3D printing in shipbuilding can reduce production costs, shorten the delivery times for spare parts and increase the innovative potential of the industry.

Keywords: *additive technologies, 3D printing, 3D printer, shipbuilding, modern materials*

Стаття прийнята 15.09.2025