

© Кирилаха С.В., Капустян О.Є.

## ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ АДТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ, ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті проаналізовано сучасні наукові підходи до дослідження корозійної поведінки титанових сплавів, отриманих методом адитивного виробництва, зокрема за технологією осадження дроту під дуговим нагрівом (*Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM*), в умовах морського середовища. Особливу увагу приділено впливу технологічних параметрів *WAAM* на мікроструктуру матеріалу, формування пасивних плівок та рівень корозійної стійкості, що визначає доцільність використання таких виробів у суднобудуванні та суміжних галузях. Високий рівень питомої міцності, низька щільність та добрі антикорозійні властивості обумовлюють активне впровадження титанових матеріалів у конструкції морського та авіаційного призначення. Проте структура та властивості виробів, одержаних різними адитивними технологіями (*WAAM, SLM, EBM*), суттєво відрізняються від традиційно оброблених матеріалів. У статті систематизовано експериментальні дані щодо впливу мікроструктури, орієнтації зразків, температурних режимів та параметрів друку на корозійну поведінку *Ti-6Al-4V* у розчині *NaCl*. Особливу увагу приділено порівнянню електрохімічних характеристик *WAAM*-деталей із кованими аналогами, а також моделюванню імпедансних параметрів за допомогою еквівалентних електричних схем. Окреслено основні механізми деградації пасивного шару, пов'язані з неоднорідністю структури та наявністю зон повторного нагріву. Також представлено приклади деталей, які можуть виготовлятися з титану для морського транспорту, зокрема фланці, корпусні елементи, гвинтові вузли, насоси. Зроблено акцент на актуальності розроблення оптимізованих режимів *WAAM*-друку для забезпечення довговічності титанових виробів у солоній воді. Отримані результати можуть бути використані для підвищення корозійної стійкості морських конструкцій, виготовлених з адитивних титанових сплавів, шляхом контролю технологічних параметрів та подальшої термічної обробки. Проведений порівняльний аналіз результатів поляризаційних та імпедансних досліджень показав, що *WAAM*-зразки поступаються кованим за корозійною стійкістю через мікроструктурні особливості. Разом з тим, оптимізація параметрів процесу дозволяє знизити швидкість корозії у понад 3 рази порівняно з гарячекатаними аналогами.

**Ключові слова:** титанові сплави; *WAAM*; адитивне виробництво; корозійна стійкість; морське середовище; електрохімічні властивості; мікроструктура; *SLM*; *EBM*; імпедансна спектроскопія.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** У сучасних умовах експлуатації елементів морських і річкових суден зростають вимоги до структурних матеріалів, що застосовуються для виготовлення корпусних конструкцій, трубопровідних систем, вузлів і з'єднань. Ці елементи працюють в умовах агресивного морського середовища, під впливом змін температури, механічних навантажень та електрохімічної корозії, що обумовлює необхідність забезпечення їх довготривалої корозійної стійкості. Агресивна дія солоні води, змін температури та механічних навантажень значно знижують довговічність і надійність традиційних конструкційних матеріалів, спричиняючи прискорену корозію, мікротріщини та втрату функціональних властивостей. Зниження ресурсу таких елементів призводить до зростання витрат на ремонт, простоїв, а у деяких випадках — до аварійних ситуацій із ризиками для довкілля [1, 2], що обумовлює необхідність забезпечення їх довготривалої корозійної стійкості.

Одним із найперспективніших матеріалів у цьому контексті залишається титан і його сплави, зокрема *Ti6Al4V* (Grade 5), завдяки поєднанню високої питомої міцності, виняткової корозійної стійкості, біосумісності та доведеної експлуатаційної надійності у морських конструкціях; збалансованим механічним властивостям, термостійкості та високій здатності до пасивації. Його

стійкість до точкової, щілинної та міжкристалітної корозії робить його пріоритетним для застосування в морській інженерії [3, 4, 5, 15, 16, 17] у конструкційних елементах підводного й надводного флоту, включно з корпусами апаратів, гвинтами, насосами та елементами теплообмінників. У порівнянні з нержавіючими сталями та алюмінієвими сплавами, титанові сплави забезпечують кращу довговічність за умов багаторічного контакту з морським середовищем [1, 6, 7, 8, 14].

Аддитивні технології, зокрема WAAM, відкривають перспективи щодо створення корозійностійких відповідальних великогабаритних, і високотехнологічних конструкцій з покращеною геометричною складністю або критично навантажених деталей з титану та зниженням ваги при збереженні або підвищенні експлуатаційних властивостей [9, 10, 11, 20, 21, 22]. До таких деталей належать кріпильні гвинти, корпусні елементи насосів, фланці трубопроводів, а також складні корпуси насосів і клапанів [12, 13, 16, 19].

Інтеграція адитивних технологій у виробництво компонентів морського транспорту зумовлює підвищені вимоги до матеріалів, здатних витримувати агресивні умови морського середовища. Проте поширення 3D-друку у судновій галузі стримується недостатньою вивченістю поведінки надрукованих матеріалів у морському середовищі, особливо в аспекті локальної та міжфазної корозії, що може виникати через специфічну мікроструктуру виробів, виготовлених методом WAAM, SLM або EBM. Мікроструктурні особливості матеріалів, сформованих унаслідок пошарового наплавлення, значною мірою впливають на їхню корозійну поведінку, що потребує детального дослідження та обґрунтування технологічних рішень щодо підвищення їх експлуатаційної стійкості. Необхідність розуміння корозійних механізмів, впливу умов і можливих шляхів покращення стійкості таких матеріалів набуває практичного значення для підвищення надійності конструкцій, зниження вартості технічного обслуговування, продовження ресурсу суднових систем і зменшення кількості аварійних відмов [3, 4, 14, 15].

Також незважаючи на значний обсяг публікацій, залишається недостатньо розробленим комплексний аналіз ефекту технологічних параметрів адитивних технологій на корозійну поведінку деталей у морському середовищі. Зокрема, недостатньо систематизовано вплив таких параметрів, як швидкість подачі дроту та струм дуги у WAAM, енергія лазера, швидкість сканування та крок шару у SLM, а також густина електронного пучка та швидкість плавлення у EBM, на формування мікроструктури та, відповідно, на корозійну стійкість. Означена робота спрямована на аналіз цих взаємозв'язків та формування практичних настанов для підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів у суднобудівній галузі.

Широке впровадження адитивних технологій у судновій галузі обмежується недостатньою вивченістю корозійної поведінки адитивно виготовлених матеріалів у морському середовищі, зокрема процесів локальної та міжфазної корозії, зумовлених характерною для технологій WAAM, SLM і EBM мікроструктурною неоднорідністю. Специфічні особливості фазового складу, текстури та термічної історії таких матеріалів можуть призводити до формування електрохімічно активних ділянок, що підвищує їхню схильність до деградаційних процесів в умовах морської експлуатації. У зв'язку з цим поглиблене розуміння механізмів корозії, впливу морських факторів та ефективних підходів до підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів набуває істотного практичного значення для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності суднових конструкцій, зменшення витрат на технічне обслуговування та подовження їхнього ресурсу.

Таким чином, дослідження корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених із використанням технологій 3D-друку, має безпосередній зв'язок із вирішенням актуальних практичних завдань морського і річкового транспорту, відповідає вимогам екологічної безпеки та енергоефективності і є актуальним напрямом наукових розвідок у галузі транспортного матеріалознавства [5, 6].

Актуальність дослідження. Проблема забезпечення довготривалої надійності та корозійної стійкості матеріалів конструкцій морського і річкового транспорту залишається актуальною, особливо з урахуванням розвитку технологій адитивного виробництва. Таким чином, дослідження корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених із використанням технологій 3D-друку, має безпосередній зв'язок із вирішенням актуальних практичних завдань морського і річкового транспорту, відповідає

вимогам екологічної безпеки та енергоефективності і є актуальним напрямом наукових розвідок у галузі транспортного матеріалознавства [5, 6, 16, 17].

Використання титанових сплавів, зокрема отриманих методами адитивного виробництва, відкриває нові можливості щодо створення корозійностійких і високотехнологічних конструкцій. Проте мікроструктурні особливості матеріалів, сформованих унаслідок пошарового наплавлення, значною мірою впливають на їхню корозійну поведінку, що потребує детального дослідження та обґрунтування технологічних рішень щодо підвищення їх експлуатаційної стійкості.

У даній роботі проаналізовано чинники, що визначають корозійну стійкість 3D-друкованих титанових сплавів в умовах морського середовища, з урахуванням технологічних параметрів виготовлення та експлуатаційних навантажень. Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації щодо підвищення ефективності та надійності таких матеріалів у суднобудівній галузі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема забезпечення довготривалої корозійної стійкості матеріалів у морському середовищі залишається актуальною в сучасному матеріалознавстві, особливо з урахуванням розвитку технологій адитивного виробництва. Дослідження [1-3] свідчать про те, що титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, характеризуються високою корозійною тривкістю в агресивних умовах, однак мікроструктурні особливості, зумовлені пошаровим нарощуванням, можуть призводити до неоднорідності структури та появи дефектів, що впливають на експлуатаційні властивості.

У роботах [4, 5] проаналізовано вплив параметрів адитивного виготовлення, зокрема швидкості подачі дроту, температурного поля та режимів охолодження, на фазовий склад та морфологію  $\alpha+\beta$ -структури, що, у свою чергу, впливає на стійкість до пітингової та щілинної корозії. У публікації [6] автори розглядають ефективність термомеханічної обробки для зменшення залишкових напружень та стабілізації структури титанових деталей, виготовлених WAAM-методом, з метою покращення довговічності в морських умовах. Новітні дослідження [7-11] висвітлюють перспективні підходи для підвищення корозійної стійкості титанових сплавів, отриманих методом адитивного виробництва.

Зокрема, у роботі Yadav S. [7] вперше запропоновано метод оптимізації теплового режиму WAAM, що забезпечує більш однорідну мікроструктуру без внутрішніх дефектів, що позитивно впливає на корозійну поведінку. Автори здійснили комплексний аналіз впливу параметрів процесу, таких як швидкість подачі дроту, швидкість руху та тепловий режим, на геометрію та морфологію осаджених матеріалів.

Особливу увагу приділено постпроцесним термічним обробкам, які оптимізують мікроструктуру та покращують механічні властивості осаджених матеріалів. Ці результати є важливими для покращення корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених за допомогою WAAM, що є критичним для їх застосування в морських конструкціях.

У дослідженнях останніх років підтверджено, що мікроструктура, дефекти та оксидоутворення в Ti-6Al-4V, виготовленому WAAM, безпосередньо впливають на корозійну поведінку у морських середовищах. Зокрема, Birmingham та ін. [8] показали, що термічна обробка сприяє формуванню більш однорідної  $\beta$ -фази та зниженню кількості дефектів, що в свою чергу забезпечує кращу стабільність пасивної плівки на поверхні сплаву. Подібні результати отримані й у роботі Hemmasian Etefagh [25, 27], де підкреслюється ключова роль морфології оксидного шару у захисті від пітингової корозії.

Дослідження Hemmasian Etefagh (2021) [25, 27] показало, що оптимізація параметрів адитивного виробництва може знизити швидкість корозії титанових сплавів у солоній воді приблизно на 30–50 %, що підтверджує їхню придатність для морських конструкцій.

У дослідженні Hemmasian Etefagh (2021) [25] оцінено корозійну стійкість титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методом лазерного порошкового спікання (LPBF), до та після термічної обробки. Виявлено, що швидкість корозії якості сплавів у солоній воді була майже в 16 разів гіршою порівняно з комерційними зразками. Це пов'язано з наявністю нееквілібріумної мартенситної фази  $\alpha'$ , що утворюється через швидке охолодження під час процесу AM.

Після термічної обробки при 800 °C протягом 2 годин спостерігалось значне покращення корозійної стійкості, що робило її порівнянною з комерційними сплавами завдяки зняттю залишкових

напруг та утворенню  $\beta$ -фази з більшою корозійною стійкістю. Ці результати підтверджують доцільність використання адитивно виготовлених титанових сплавів у морських конструкціях за умови застосування відповідної термічної обробки для покращення їх корозійної стійкості.

У статті Fernandez L., Martinez J. (2023) [9] досліджено комбінований вплив лазерної обробки поверхні та анодування на корозійну стійкість адитивно виготовлених титанових сплавів Ti-6Al-4V. Цей підхід спрямований на покращення експлуатаційних характеристик матеріалів для морських конструкцій, де корозія є критичним фактором. Основні результати: Корозійна стійкість: Комбіноване застосування лазерної обробки та анодування призвело до значного зниження швидкості корозії у солоній воді, що підтверджує ефективність цього підходу для морських конструкцій. Механічні властивості:

Після комбінованої обробки спостерігалось значне покращення мікротвердості поверхні, що свідчить про підвищення механічної міцності матеріалу. Мікроструктура: Лазерна обробка сприяла утворенню більш однорідної структури поверхневого шару, що зменшило кількість дефектів та підвищило стабільність пасивної плівки. Це дослідження є першим, яке комбінує лазерну обробку та анодування для покращення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів, і його результати можуть бути корисними для подальших розробок у галузі матеріалознавства та інженерії.

Дослідження [10, 11] демонструють застосування новітніх електрохімічних методів для прискореного моделювання корозійної поведінки, що сприяє оперативному коригуванню технологічних параметрів для підвищення експлуатаційної стійкості.

У дослідженні (Wang & Li, 2020) [10] оцінено корозійну стійкість титанових сплавів, виготовлених адитивним методом, у симульованих морських умовах (3,5 % NaCl). Використання електрохімічних методів, зокрема потенціостатичного вимірювання та кривих поляризації, дозволило визначити потенціал корозії та щільність корозійного струму, що сприяє оперативному коригуванню технологічних параметрів для підвищення експлуатаційної стійкості. Дослідження показало, що адитивно виготовлені титанові сплави мають специфічну мікроструктуру з дрібнозернистими колоноподібними зернами, що значною мірою визначає швидкість корозії та ефективність пасиваційного шару в морських умовах.

У дослідженні (Kim & Choi, 2019) [11] застосовано прискорене корозійне тестування титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методом WAAM, за допомогою спектроскопії електрохімічної імпедансії (EIS). Цей підхід дозволяє ефективно оцінювати корозійну поведінку матеріалів, зокрема визначати резистивні та ємнісні характеристики пасиваційного шару, що є критично важливим для оптимізації технологічних параметрів процесу WAAM і підвищення експлуатаційної надійності.

Особливо цінним є те, що прискорене тестування дає змогу швидко порівнювати вплив різних параметрів наплавлення на корозійну стійкість, що робить його ефективним інструментом для аналізу публікацій і розробки нових технологічних підходів. Дослідження підтверджують ефективність сучасних електрохімічних методів, зокрема EIS, для швидкої та кількісної оцінки корозійної поведінки адитивно виготовлених титанових сплавів та оптимізації технологічних параметрів для підвищення їх експлуатаційної стійкості.

Одним із перших прикладів цілеспрямованого управління корозійною поведінкою адитивно виготовленого Ti-6Al-4V через модифікацію процесу WAAM є робота [12]. У дослідженні Shao Z. Ta ін. (2023) [12] запропоновано підхід до оптимізації корозійних властивостей сплаву Ti-6Al-4V шляхом застосування магнітної осциляції дуги у процесі WAAM. Показано, що такий технологічний прийом сприяє впорядкуванню  $\alpha$ -зернистої структури, підвищенню їхньої кількості та формуванню більш однорідного приповерхневого шару, що прискорює утворення стабільної пасивної оксидної плівки, стійкої до хлорид-індукованої локалізованої корозії. Запропоноване рішення є особливо релевантним для промислового виготовлення великогабаритних титанових компонентів, де однорідність мікроструктури та прогнозована корозійна поведінка мають вирішальне значення.

У дослідженні Yu та ін. (2022) [13] проведено порівняльний аналіз мікроструктури та електрохімічної поведінки титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методами селективного лазерного плавлення (SLM), електронно-променевого плавлення (EBM) та ізотермічного формування (ISF) у розчині 3,5 % NaCl, що імітує морське середовище.

Результати показали суттєву різницю в корозійній поведінці зразків залежно від технології: ISF-зразки продемонстрували найвищу корозійну стійкість (низьку густину пасиваційного струму та високий опір поляризації), тоді як SLM-зразки мали найгірші показники, а EBM займали проміжне положення. Це свідчить, що щільність і стабільність пасиваційного шару значною мірою визначаються мікроструктурою, сформованою під час друку. Автори підкреслюють, що контроль морфології  $\alpha$ - та  $\beta$ -фаз є ключовим чинником підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених сплавів Ti-6Al-4V у хлоридовмісних середовищах, що має особливе значення для застосувань у морських конструкціях та елементах водного транспорту.

Дослідження Alvarez та ін. (2017) [14] показало, що термічна обробка та хімічне перетворення титанового сплаву Ti6Al4V суттєво підвищують його корозійну стійкість. Застосування електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS) та потенціостатичного вимірювання дозволило встановити, що модифікація сприяє формуванню щільного оксидного шару, який ефективно захищає матеріал у агресивному середовищі (3,5% NaCl). Результати підтверджують ефективність подібних підходів для підвищення експлуатаційної надійності титанових сплавів.

У роботі Lin та співавторів (2021) [21] здійснено систематичний огляд сучасного стану розробки технології WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) із позиції її застосування до титанових сплавів, насамперед Ti-6Al-4V. Автори детально аналізують технологічні аспекти процесу, серед яких особливу увагу приділено типам джерел енергії (GTAW, PAW, GMAW) і типу використовуваного дроту. Встановлено, що контроль над теплонадходженням, швидкістю подачі дроту та режимами переміщення є критично важливими для забезпечення стабільності процесу та якості сформованих шарів. Огляд також підкреслює, що стабільність процесу та контроль теплонадходження безпосередньо впливають на формування однорідної мікроструктури, яка визначає подальшу корозійну поведінку титанових сплавів.

З точки зору мікроструктурних і фазових особливостей WAAM-заготовки з титанових сплавів характеризуються анізотропною мікроструктурою, зокрема формуванням колоноподібних  $\beta$ -зерен, витягнутих у напрямку нарощування шару, а також появою зон повторного термічного впливу (heat-affected bands). Такі особливості істотно впливають як на механічні властивості, так і на корозійну стійкість, про що свідчить значна кількість експериментальних робіт, проаналізованих у публікації [15-22].

Важливо, що Lin та співавтори [21] наголошують на перевагах WAAM для виробництва великогабаритних, геометрично складних або критично навантажених деталей з титану, зокрема у галузях авіації та морської інженерії, де необхідне поєднання високої міцності, корозійної стійкості та малої питомої маси. Визначено також, що потенціал WAAM найбільш повно розкривається за умов застосування гібридних підходів, зокрема поєднання адитивного формування з термомеханічною постобробкою або легуванням у процесі осадження. Таким чином, робота [21] надає вичерпне уявлення про поточні досягнення, проблеми та перспективи розвитку WAAM-технології щодо титанових сплавів, а також визначає стратегічні напрями подальших досліджень у цьому напрямі.

У роботі [23] за допомогою електрохімічної імпедансної спектроскопії досліджено формування пасивних плівок на титанових сплавах, отриманих адитивними технологіями, що дозволило кількісно оцінити опір переносу заряду та захисні властивості оксидного шару. У публікації [24] показано, що пасивні плівки на 3D-друкованих Ti-сплавах відрізняються меншою товщиною та однорідністю порівняно з традиційно обробленими матеріалами, проте термічна обробка після друку сприяє підвищенню їхньої корозійної стійкості.

У дослідженні Yang та ін. (2017) [1] було оцінено корозійну поведінку титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методом WAAM, у 3,5% розчині NaCl. Показано, що зразки WAAM мають задовільний пасивний потенціал – 0,34 В та Ag/AgCl та щільність корозійного струму 0,45  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , що свідчить про прийнятну корозійну стійкість порівняно з кованими аналогами (пасивний потенціал – 0,36 В, щільність струму 0,42  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Водночас підвищена пористість і неоднорідність мікроструктури спричиняють локальні активні ділянки [1].

У роботі Qiu та інші (2021) [29] досліджено корозійну поведінку Ti-6Al-4V, виготовленого методами SLM, EBM та SPS, у 10% розчині сульфаміду. Виявлено, що фракція  $\beta$ -фази становила 11,8%

у SPS-зразках, 5,3% у SLM та 2,6% у EBM. Найкращу корозійну стійкість продемонстрували SPS-зразки завдяки високій щільності зерен та  $\beta$ -фази, SLM-зразки мали найгіршу стійкість, а EBM виявився найбільш вразливим [29].

У дослідженні Н.М.-Sanchez та співавторів (2024) [30] порівнювалась корозійна поведінка Ti-6Al-4V, виготовленого методом лазерного плавлення порошкового шару (LPBF) та литтям, у 3,5% NaCl. LPBF-зразки показали більш негативний корозійний потенціал  $-0,52$  В vs Ag/AgCl та щільність корозійного струму  $1,12$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , тоді як литі зразки мали  $-0,48$  В і  $0,95$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Автори відзначили, що підвищена дислокаційна щільність і внутрішні напруження LPBF-зразків сприяють локальній корозії [30].

Узагальнюючи наведені дані, сучасні адитивні технології (WAAM, SLM, EBM, SPS) забезпечують різну корозійну стійкість Ti-6Al-4V, що безпосередньо залежить від мікроструктури, щільності зерен, пористості та  $\beta$ -фази. Найстійкіші зразки – із високим вмістом  $\beta$ -фази та щільною мікроструктурою (SPS), тоді як методи із підвищеною внутрішньою напруженістю (SLM, LPBF) демонструють більшу локальну корозію.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Незважаючи на значний обсяг публікацій, залишається недостатньо розробленим комплексний аналіз ефекту технологічних параметрів адитивних технологій на корозійну поведінку деталей у морському середовищі, що включає як іонову агресію, так і температурно-вологісні коливання. Зокрема, недостатньо систематизовано вплив таких параметрів, як швидкість подачі дроту та струм дуги у WAAM, енергія лазера, швидкість сканування та крок шару у SLM, а також густина електронного пучка та швидкість плавлення у EBM, на формування мікроструктури та, відповідно, на корозійну стійкість. Означена робота спрямована на аналіз цих взаємозв'язків та формування практичних настанов для підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів у суднобудівній галузі.

Наукова новизна даної роботи полягає у комплексному узагальненні сучасних матеріалознавчих знань щодо корозійної стійкості 3D-друкованих титанових сплавів, виготовлених різними адитивними технологіями, із особливим акцентом на вплив конкретних технологічних параметрів виробництва та мікроструктурних особливостей на поведінку матеріалів у морському середовищі.

Вперше систематизовано результати експериментальних досліджень, що демонструють взаємозв'язок між режимами адитивного виготовлення, типом мікроструктури та корозійною тривкістю, а також окреслено практичні рекомендації щодо підвищення експлуатаційних характеристик титанових виробів у суднобудівній галузі.

#### **Формулювання цілей статті (постановка завдання)**

Метою даної роботи є комплексний аналіз корозійної стійкості 3D-друкованих титанових сплавів у морському середовищі з урахуванням впливу технологічних параметрів виготовлення. Для досягнення цієї мети поставлено завдання: - проаналізувати особливості мікроструктури адитивно виготовлених титанових сплавів; – оцінити корозійну поведінку зразків у штучних морських розчинах; - запропонувати рекомендації щодо підвищення корозійної тривкості матеріалів для застосування у суднобудуванні. Для досягнення цієї мети поставлено завдання:

- проаналізувати особливості мікроструктури адитивно виготовлених титанових сплавів та їх вплив на корозійну поведінку зразків у штучних морських розчинах;

Систематизувати вплив таких параметрів, як швидкість подачі дроту та струм дуги у WAAM, енергія лазера, швидкість сканування та крок шару у SLM, а також густина електронного пучка та швидкість плавлення у EBM, на формування мікроструктури та, відповідно, на корозійну стійкість

- запропонувати рекомендації щодо підвищення корозійної тривкості матеріалів для застосування у суднобудуванні.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженнях, розглянутих у цій роботі, використовувалися різні методи оцінки мікроструктурних і корозійних характеристик титанових сплавів, виготовлених за допомогою адитивних технологій. Зокрема, застосовувалися оптична металогія, сканувальна електронна мікроскопія (SEM), рентгенівська дифрактометрія (XRD) для аналізу фазового складу, а також методи вимірювання твердості для оцінки механічних властивостей.

Основний акцент зроблено на електрохімічних дослідженнях, що проводилися у 3,5% розчині NaCl для імітації морського середовища. Вимірювання електрохімічних характеристик зразків здійснювалися методом потенціодинамічної поляризації та методом електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS). Останній дозволив оцінити ємнісні та дифузійні властивості оксидної плівки, утвореної на поверхні титанових сплавів, та встановити ступінь захисної дії пасивного шару. Дані EIS були проаналізовані з використанням еквівалентних електричних схем для моделювання процесів на межі поділу метал/електроліт.

Оцінка впливу орієнтації виготовлення, мікроструктури та залишкових напружень проводилася шляхом порівняння результатів для зразків, отриманих методами WAAM, SLM, EBM і кування, згідно з опублікованими літературними даними [1–4, 13].

У дослідженні [14] для модифікації титанових сплавів Ti6Al4V застосовували комбіновану обробку, що включала термічну обробку та хімічне перетворення поверхні. Зразки піддавали нагріванню до температур 700 °C та 800 °C із подальшим охолодженням у печі, що забезпечувало формування термічно стабільної мікроструктури сплаву.

Паралельно проводили хімічну обробку з використанням церійсульфату (CeCCT), яка сприяла утворенню щільного оксидного шару на поверхні матеріалу. Поєднання цих методів дозволяло підвищити корозійну стійкість титанових сплавів та створювало передумови для подальшого дослідження їхньої електрохімічної поведінки в агресивних середовищах.

Вибір методів WAAM, SLM, EBM і кування обумовлений їхньою порівняльною цінністю для оцінки впливу різних адитивних та традиційних технологій на мікроструктуру і корозійну поведінку титанових сплавів. Використання еквівалентних електричних схем дозволяє кількісно оцінити характеристики пасивного шару та захисні властивості матеріалу, що забезпечує більш точне моделювання процесів на межі поділу метал/електроліт.

### **Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.**

#### **1.1 Порівняння орієнтації виготовлення зразків методами SLM, EBM та кування.**

Орієнтація побудови зразків Ti-6Al-4V при адитивному виробництві є критичною для морського застосування, оскільки вона визначає формування текстури, напрямку росту кристалів та залишкові напруження, що безпосередньо впливають на механічні властивості та корозійну стійкість. У порівнянні з традиційними методами, такими як кування, адитивні технології, зокрема SLM та EBM, забезпечують високу точність виготовлення, але можуть призводити до значної анізотропії властивостей залежно від орієнтації зразка [6, 20, 18; 26].

Згідно з дослідженням X. Zhao [26], зразки Ti-6Al-4V, виготовлені методом SLM, демонструють вищу межу текучості (UTS) порівняно з EBM, але мають нижчу пластичність. Зокрема, UTS для SLM зразків становить близько 1100 МПа, тоді як для EBM — близько 950 МПа. Однак пластичність у SLM зразків значно нижча, що може обмежувати їх застосування в умовах, де важлива висока пластичність матеріалу.

Ці відмінності обумовлені різними механізмами охолодження та швидкостями охолодження в процесах SLM та EBM, що впливає на мікроструктуру та розподіл залишкових напружень у матеріалі. Наприклад, у SLM процесі швидке охолодження може призводити до утворення дрібнозернистої структури, що сприяє підвищенню міцності, але знижує пластичність. У свою чергу, EBM процес з більш повільним охолодженням може сприяти утворенню більш крупнозернистої структури з кращими механічними властивостями в умовах навантаження.

Таким чином, вибір орієнтації побудови зразка та технології виготовлення є важливими факторами, що впливають на кінцеві механічні властивості та корозійну стійкість виробів з Ti-6Al-4V, особливо в умовах морського застосування, де ці характеристики є критичними.

Для наочності та порівняння впливу орієнтації побудови на мікроструктуру та механічні властивості, на схемі зображено (рис. 1) орієнтацію побудови зразків Ti-6Al-4V при адитивному виготовленні за технологіями SLM (Selective Laser Melting) та EBM (Electron Beam Melting). Напрямок нашарування є вертикальним щодо платформи побудови, що безпосередньо впливає на формування структури з аксіально орієнтованою текстурою та анізотропією механічних властивостей.

Найбільший інтерес для порівняння становлять зразки, виготовлені методами SLM та електронно-променевого плавлення ЕВМ, оскільки вони демонструють принципово різні фазові стани при друці Ti-6Al-4V, тоді як ковани зразки виступають еталоном.

Вертикальна орієнтація побудови зразків зумовлює формування спрямованого теплового потоку вздовж осі нашарування, що сприяє росту витягнутих первинних  $\beta$ -зерен та розвитку аксіально орієнтованої кристалографічної текстури. У випадку SLM це призводить до переважного формування мартенситної  $\alpha'$ -фази внаслідок високих швидкостей охолодження, тоді як для ЕВМ характерне формування рівноважної ламелярної  $\alpha+\beta$ -мікроструктури через підвищену температуру робочої камери та знижену швидкість кристалізації. Така відмінність у фазовому стані є визначальним чинником анізотропії механічних властивостей, зокрема різниці у межі міцності та пластичності залежно від напрямку навантаження відносно осі побудови.

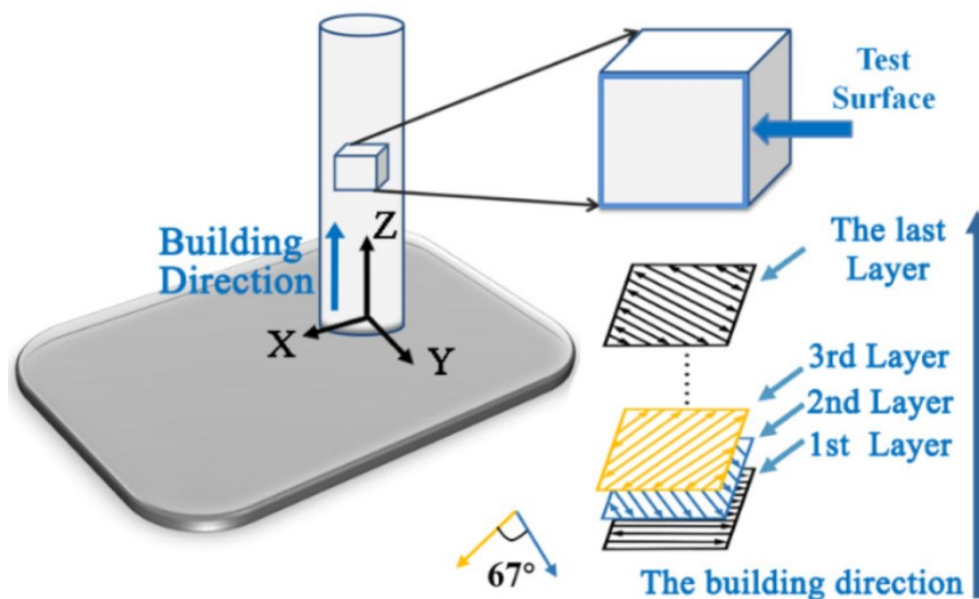


Рисунок 1 – Схематичне зображення зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM та ЕВМ у вертикальному напрямку [1]

У таблиці 1 узагальнено основні орієнтаційні підходи до виготовлення зразків титанових сплавів методами SLM, ЕВМ та кування, що впливають на мікроструктуру та, відповідно, на корозійну поведінку у морському середовищі.

Таблиця 1 – Характеристика орієнтації виготовлення зразків титанових сплавів методами SLM, ЕВМ та кування [1-4]

Метод	Орієнтація будування	Типова структура	Корозійна поведінка
SLM	вертикальна	колоноподібні $\beta$ -зерна, залишкова напруга	підвищена локальна корозійна активність
ЕВМ	горизонтальна	рівномірні $\alpha+\beta$ фази, менше напружень	краща стабільність та нижча щільність корозійного струму
Кування	ізотропна структура	рекристалізована $\alpha+\beta$ структура	найвища корозійна стійкість

Такий підхід дозволяє встановити зв'язок між орієнтацією побудови, структурною неоднорідністю та електрохімічними характеристиками зразків. Зокрема, орієнтація, що зумовлює формування колоноподібних зерен і залишкових напружень, сприяє утворенню мікропотенцій, які активізують локальні корозійні процеси. Натомість рекристалізована структура, характерна для кованих зразків, має підвищену стабільність у морському середовищі.

## 1.2. Фазовий склад та електрохімічна поведінка зразків Ti-6Al-4V, виготовлених різними методами

1.2.1 Фазовий склад: результати XRD-аналізу. У дослідженні [13] проведено рентгеноструктурний аналіз зразків сплаву Ti-6Al-4V, виготовлених за допомогою SLM, EBM і традиційного кування (ISF). Отримані дифрактограми (рис. 2, а) демонструють помітні відмінності у фазовому складі в залежності від технології обробки.

Зокрема, у SLM-зразку виявлено зсув піків у бік більших дифракційних кутів (рис. 2, b), що свідчить про наявність залишкової  $\beta$ -фази та внутрішніх напружень, зумовлених швидким охолодженням. Для зразка, виготовленого методом EBM, характерною є присутність  $\alpha'$ -мартенситної фази, що формується в умовах помірного градієнта температур. У той час як кований зразок має стабільну двофазну структуру  $\alpha+\beta$ , типову для рівноважних умов охолодження. Таким чином, за результатами XRD-аналізу встановлено, що швидкість охолодження та теплова історія при адитивному виробництві значно впливають на фазовий склад і залишкові напруження [13].

Найбільший інтерес для порівняння становлять SLM та EBM, оскільки вони демонструють принципово різні фазові стани при друці Ti-6Al-4V, тоді як ковані зразки виступають еталоном.

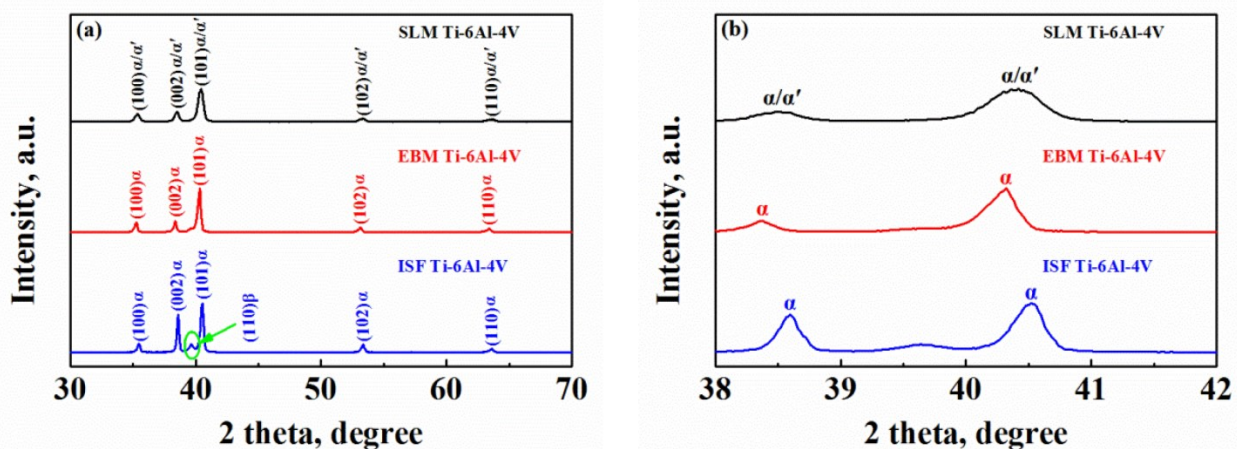


Рисунок 2 – (а) Дифрактограми зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM, EBM і кування; (b) збільшений фрагмент ділянки кутів  $38^\circ$ – $42^\circ$  з ідентифікованими фазовими відмінностями [13]

### 1.2.2 Аналіз методом електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS)

Метод електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS) є одним із найбільш інформативних способів дослідження корозійних процесів та характеристик пасивних плівок на поверхні металів і сплавів. У контексті досліджень корозійної стійкості 3D-друкованих титанових сплавів метод EIS дозволяє кількісно оцінити електрохімічні параметри, такі як опір заряду, ємність подвійного шару та властивості дифузії в оксидному шарі.

Проведені вимірювання в 3,5% розчині NaCl показали, що еквівалентні електричні схеми для аналізу імпедансних спектрів зазвичай містять послідовно-паралельні ланцюги резисторів та ємностей, що моделюють оксидний шар, електроліт та процеси на межі поділу фаз. Найчастіше використовуються схеми R(QR) або R(Q(R(QR))) залежно від складності пасивної плівки та наявності дифузійних обмежень.

Порівняння спектрів EIS для зразків, виготовлених методами WAAM, SLM та кування, свідчить про різний рівень захисної дії пасивних плівок. Зразки кованих титанових сплавів демонструють найвищий опір заряду ( $R_{ct}$ ), що відповідає більш стабільній і щільній пасиваційній плівці, тоді як SLM-зразки мають найнижчий  $R_{ct}$ , що свідчить про більшу проникність плівки і вищу корозійну активність [11, 22, 23]. Таким чином, метод EIS дозволяє кількісно порівняти стабільність пасивного шару для різних технологій виробництва, що є критично важливим для морських умов експлуатації.

Додатково було виявлено, що термічна обробка WAAM-зразків сприяє збільшенню опору заряду та зниженню ємності оксидної плівки, що пов'язано з ущільненням структури та зменшенням дефектності оксидного шару.

Таким чином, метод EIS надає детальну інформацію про механізми корозії та якість захисних плівок на 3D-друкованих титанових сплавах, що є важливим для оптимізації технологічних режимів виготовлення та подальшої експлуатації виробів у морському середовищі.

### 1.3. Результати імпедансної спектроскопії (EIS)

Електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS) дозволяє глибше дослідити механізми захисту металу на межі поділу метал/електроліт, надаючи інформацію про електрохімічні процеси у пасивному стані. Аналіз Nyquist- та Bode-діаграм зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM, EBM та кування, показав різну імпедансну поведінку у 3,5% розчині NaCl.

Згідно з даними Kim & Choi (2019) [11], максимальний опір заряду спостерігається у кованих зразків, що свідчить про найстабільніший пасивний шар. Зразки, виготовлені методом EBM, демонструють проміжні значення, тоді як найнижчі значення імпедансу характерні для SLM-зразків, що вказує на вищу проникність оксидного шару та наявність дефектів.

Подібні результати підтверджено також у дослідженнях A.S Kannan та ін. (2019) [23] та C.R. Clayton та ін. (2020) [24], де показано вплив мікроструктурних особливостей, зумовлених технологією виготовлення, на смісні та резистивні характеристики пасивного шару. Вплив мікроструктури на властивості пасивного шару особливо критичний для морських застосувань, де він визначає довговічність і надійність конструкцій. Таким чином, EIS-аналіз дозволяє не лише кількісно оцінити корозійну стійкість, а й виявити специфічні відмінності у поведінці пасивного шару залежно від методу адитивного виробництва.

### 1.4 Електрохімічні характеристики: аналіз потенціодинамічних кривих

Графіки потенціодинамічного поляризаційного тестування (рис. 3) в 3,5% розчині NaCl демонструють відмінності в корозійній поведінці залежно від методу виготовлення. Згідно з аналізом, SLM-зразок виявив найвищу корозійну активність, що проявляється в максимальному значенні струму корозії  $I_{\text{cor}}$  та найменшій стабільності пасивної плівки.

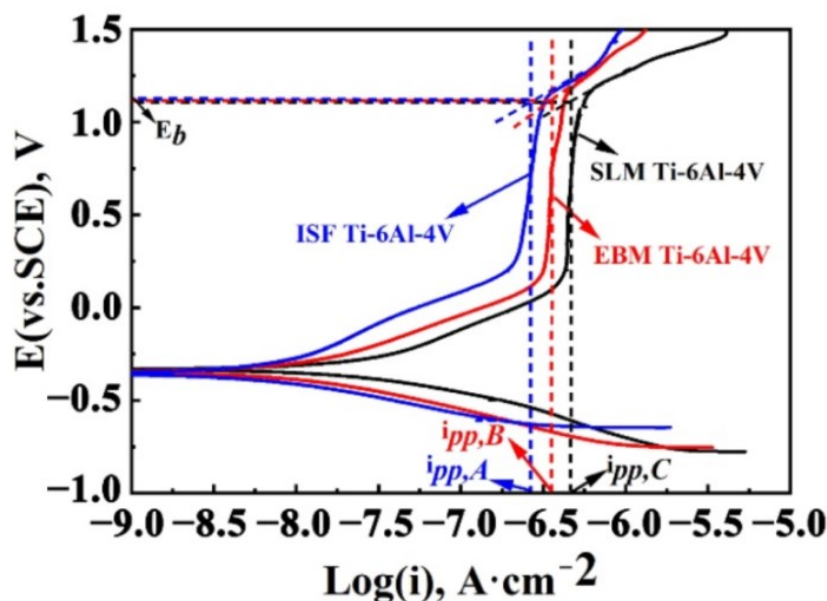


Рисунок 3 – Потенціодинамічні криві зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM, EBM і кування, у 3,5% розчині NaCl [13]

Для зразка, отриманого методом електронно-променевого плавлення (EBM), значення  $I_{\text{cor}}$  є проміжним, що свідчить про часткове зниження дефектності порівняно з SLM, але все ще нижчу ефективність пасивації, ніж у кованих зразків.

Найкращу корозійну стійкість демонструє кований зразок (ISF), який має найнижчий рівень корозійного струму та ширший пасивний інтервал. Це вказує на однорідну мікроструктуру, знижену

пористість і більш стабільну оксидну плівку, що формується на поверхні в умовах морського середовища [13].

#### 1.5. Порівняльна електрохімічна характеристика зразків у морському середовищі

Для оцінки впливу методу виготовлення на електрохімічні властивості сплаву Ti-6Al-4V у 3,5% розчині NaCl в табл. 2 систематизовано порівняльні показники потенціалу корозії, щільності корозійного струму та ширини пасивного діапазону. Було встановлено, що найвищу корозійну стійкість демонструє кований зразок, що зумовлено ефективнішою пасивацією поверхні та нижчим рівнем мікроструктурної гетерогенності [13].

Таблиця 2 – Електрохімічні характеристики зразків Ti-6Al-4V у 3.5% NaCl [13]

Метод виготовлення	Потенціал корозії (E <sub>corr</sub> ), мВ	Струм корозії (i <sub>corr</sub> ), $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Пасивний діапазон
SLM	-379	0.96	вузький
EBM	-316	0.58	середній
ISF (ковка)	-232	0.36	широкий

Згідно з даними таблиці, ковані зразки мають найменшу щільність корозійного струму та найбільш позитивний корозійний потенціал, що вказує на кращу здатність до пасивації. Зразки, виготовлені методом EBM, демонструють проміжні значення, а SLM-зразки — найгірші показники, що пов'язано з вищою дефектністю структури та залишковими напруженнями, які інтенсифікують корозійні процеси.

У рамках дослідження Yu Z. та ін. [13] було здійснено комплексне порівняння мікроструктури та електрохімічних характеристик зразків сплаву Ti-6Al-4V, виготовлених методом SLM, EBM та куванням. За допомогою SEM-аналізу встановлено відмінності у морфології зерен, фазовому складі та наявності дефектів поверхні, що суттєво впливають на формування пасивної плівки.

Зокрема, виявлено, що SLM-зразки характеризуються дрібнозернистою  $\alpha$ -фазою з великою щільністю меж, тоді як у зразках, отриманих EBM, спостерігається грубозерниста колоноподібна структура з вираженою текстурою. Для кованих зразків притаманна рівноважна, пластинчаста структура з мінімальною пористістю. Ці структурні особливості було зіставлено з результатами електрохімічного тестування в 3.5% розчині NaCl, що дозволило виявити чітку кореляцію між мікроструктурою та корозійною стійкістю. Таким чином, результати дослідження [13] засвідчили чіткий зв'язок між технологією виготовлення сплаву Ti-6Al-4V та його електрохімічною поведінкою в умовах хлоридного середовища.

Зразки, отримані методом SLM, характеризувалися підвищеним струмом корозії та вузьким пасивним діапазоном, що свідчить про нестабільність пасивної плівки внаслідок наявності залишкових напружень, пористості та дрібнозернистої  $\beta$ -фази. Водночас EBM-зразки демонстрували помірну стійкість, що пов'язано з грубішою колоноподібною структурою та меншою кількістю дефектів.

Найвищу корозійну стійкість виявлено у кованих зразках, для яких притаманна рівномірна, збалансована мікроструктура з низьким рівнем мікродфектів і стабільною пасивною плівкою. Узагальнення показників потенціалу та струму корозії, а також ширини пасивного діапазону дозволяє дійти висновку, що саме мікроструктурна однорідність і якість поверхні відіграють ключову роль у формуванні антикорозійної поведінки титанових сплавів, незалежно від номінального хімічного складу [13].

#### 1.6 Огляд корозійної поведінки Ti-6Al-4V, виготовленого методом WAAM

У дослідженні Marques та ін. (2023) [18] проведено комплексний огляд корозійної поведінки матеріалів, виготовлених методом Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), із особливим акцентом на титановий сплав Ti-6Al-4V. Автори узагальнили дані щодо впливу технологічних параметрів WAAM на формування мікроструктури та її подальший вплив на електрохімічні властивості сплаву. Зазначено, що процес WAAM забезпечує формування мікроструктурного стану, що відрізняється від традиційних методів обробки, зокрема, характерним розподілом  $\alpha$ - та  $\beta$ -фаз, текстурою зерен і розміром кристалітів.

Ці мікроструктурні особливості істотно впливають на корозійну поведінку сплаву в агресивних середовищах, зокрема в 3.5% розчині NaCl, моделюючому морські умови [18].

Поляризаційні дослідження свідчать, що зразки, виготовлені методом WAAM, демонструють задовільний пасивний діапазон і потенціал корозії, який порівнянний з традиційними кованими аналогами. Водночас відзначається підвищена корозійна активність у випадках дефектів, пор, і неоднорідностей мікроструктури, характерних для адитивного виробництва [18]. Імпедансні спектри (EIS) дозволяють розмежувати процеси пасивації та локальної корозії, демонструючи, що пасивний шар на WAAM-зразках має достатню стабільність і електрохімічну інертність у морському середовищі.

Узагальнено, що основними факторами, що визначають корозійну стійкість WAAM-деталей Ti-6Al-4V, є мікроструктурна гетерогенність, наявність технологічних дефектів, а також ефективність формування пасивного оксидного шару. Ці фактори у сукупності з контролем технологічних параметрів WAAM дозволяють оптимізувати експлуатаційні характеристики сплаву в агресивних середовищах [19].

#### 1.7 Потенційні застосування деталей із титану та корозійна поведінка WAAM-деталей Ti-6Al-4V

##### 1.7.1 Потенційні деталі з титанових сплавів у морській індустрії

Титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, завдяки їхній високій міцності, легкості та відмінній корозійній стійкості, широко застосовуються для виготовлення різних конструктивних елементів у морській, авіаційній та водній транспортній галузях. До таких деталей належать кріпильні гвинти, корпусні елементи насосів, фланці трубопроводів, а також складні корпуси насосів і клапанів [18, 19]. Адитивні технології, зокрема WAAM, дозволяють виготовляти компоненти складної геометрії з меншою вагою та покращеними експлуатаційними властивостями, зокрема корозійною стійкістю при застосуванні відповідної післяобробки [20-22].

##### 1.7.2 Огляд графічних результатів корозійних випробувань WAAM виготовлених титанових виробів

Для комплексного аналізу корозійних властивостей та мікроструктури деталей із титанових сплавів, виготовлених методом WAAM, у дослідженні [18] наведено тривимірну діаграму орієнтації зразків WAAM-фабрикованої стінки Ti-6Al-4V, поляризаційні криві та імпедансні спектри (Nyquist і Bode) для оцінки електрохімічної поведінки, а також порівняння корозійної стійкості WAAM-деталей із кованими зразками у розчині 3,5 % NaCl.

Ці матеріали дозволяють всебічно оцінити вплив технології WAAM на корозійну поведінку титанових сплавів, з урахуванням мікроструктурної анізотропії, орієнтації зерен, наявності технологічних дефектів та особливостей електрохімічної взаємодії з хлоридвмісним середовищем, що має принципове значення для прогнозування довговічності конструкцій у морських умовах.

Показано тривимірну модель стінки (рис. 4), виготовленої методом WAAM із сплаву Ti-6Al-4V, з позначенням орієнтації зразків, що використовувалися для корозійних випробувань. Визначення площин зразків (вертикальна, горизонтальна, та нормальна до шару) є критичним для оцінки анізотропії корозійної поведінки, зумовленої напрямком наростання швів та зерновою структурою. Такий підхід забезпечує більш комплексну оцінку впливу мікроструктурних особливостей WAAM на електрохімічні характеристики.

##### Аналіз поляризаційних кривих та імпедансних діаграм

Для оцінки електрохімічної поведінки зразків застосовано метод електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS) — неруйнівний метод, що дозволяє аналізувати опір пасивного шару та внутрішні електрохімічні процеси за допомогою імпедансних діаграм (Nyquist, Bode).

Автори виявили, що поляризаційні криві зразків Ti-6Al-4V, виготовлених WAAM, у 3.5% розчині NaCl демонструють стабільну пасивацію, проте з різницею у потенціалі корозії залежно від орієнтації зразка (рис. 5, а). Імпедансні дані (Nyquist та Bode діаграми, (рис. 5, b і рис. 5, c) і (рис. 6) підтверджують формування стійкого пасивного шару. Еквівалентна електрична схема (EEC), застосована для моделювання імпедансних характеристик, показує відмінності у товщині та щільності пасивної плівки, що корелює з мікроструктурною неоднорідністю.

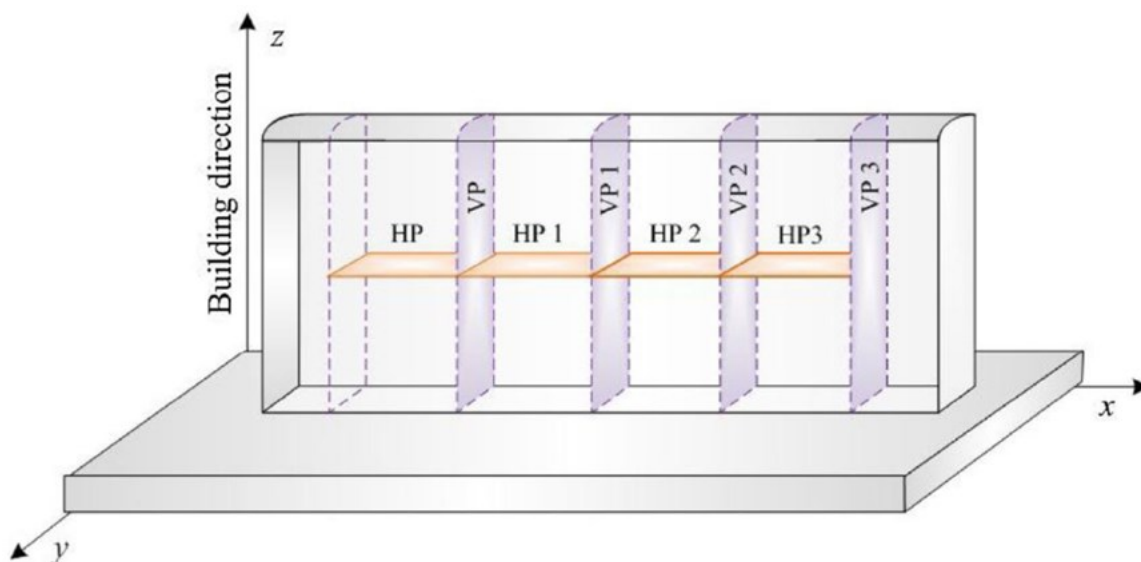
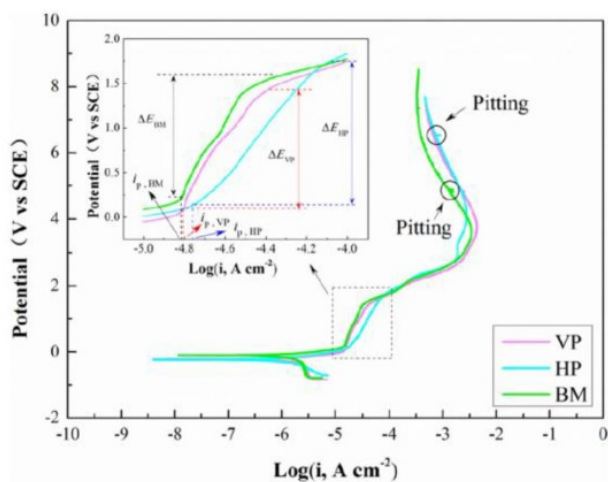
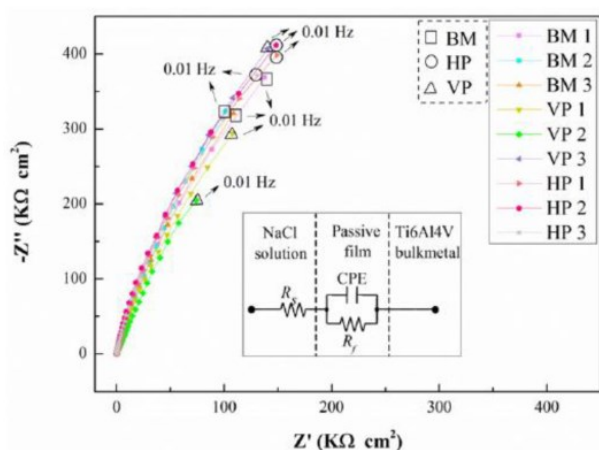


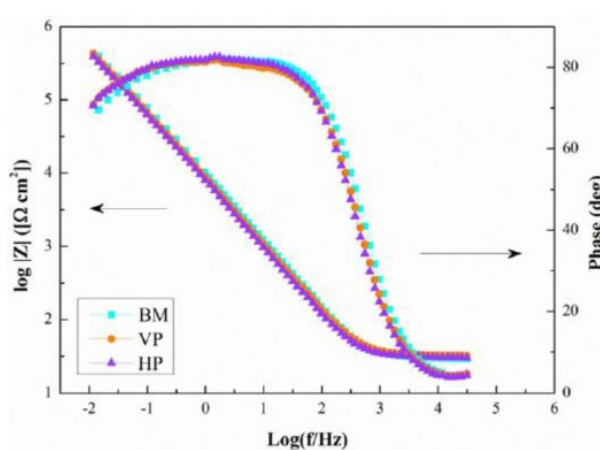
Рисунок 4 – Схематичне зображення орієнтації зразків WAAM [18, 19]



(a)



(b)



(c)

Рисунок 5 – Аналіз поляризаційних кривих та імпедансних діаграм [18, 19]

Результати порівняльного аналізу корозійної стійкості зразків сплаву Ті-6А1-4V, виготовлених методом WAAM, та кованих зразків у 3,5 % розчині NaCl наведені на рис. 6. Отримані дані свідчать про дещо нижчу корозійну стійкість WAAM-деталей, що обумовлено особливостями їхньої мікроструктури,

зокрема збільшеним розміром зерен, наявністю зон повторного термічного впливу між шарами, а також підвищеною кількістю структурних дефектів.

Наведені результати демонструють визначальний вплив термічного циклу процесу WAAM на корозійну поведінку матеріалу в агресивному середовищі. Показано, що просторово-часовий розподіл температури під час адитивного нарощування формує мікроструктурну неоднорідність, зокрема варіації розміру зерен, фазового складу та стану міжшарових зон, які безпосередньо відображаються на електрохімічній активності сплаву. Водночас встановлено, що оптимізація технологічних параметрів WAAM, зокрема регулювання тепловкладення, швидкості наплавлення та міжшарових термічних умов, дозволяє знизити інтенсивність корозійних процесів і суттєво підвищити корозійну стійкість адитивно виготовлених деталей, наближаючи її до рівня традиційно деформованих титанових сплавів.

Таким чином, корозійна поведінка адитивно виготовленого сплаву Ti-6Al-4V визначається не лише хімічним складом, а й ієрархією мікроструктурних чинників, сформованих у процесі WAAM, включаючи розмір первинних  $\beta$ -зерен, морфологію  $\alpha$ -фази та неоднорідність термічної історії між шарами. Це підтверджує ключову роль керування мікроструктурою як інструменту підвищення експлуатаційної надійності адитивних титанових деталей у корозійно активних середовищах.

#### 1.8 Висновки щодо впливу мікроструктури і технології WAAM на корозійну поведінку

Проведений аналіз підтверджує, що корозійна поведінка WAAM-деталей Ti-6Al-4V істотно залежить від орієнтації зразків відносно напрямку наростання швів, а також від параметрів формування мікроструктури, зокрема зернової морфології та гомогенності пасивного шару. Визначення оптимальних умов друку та подальша постобробка є ключовими для досягнення конкурентоспроможної корозійної стійкості таких виробів.

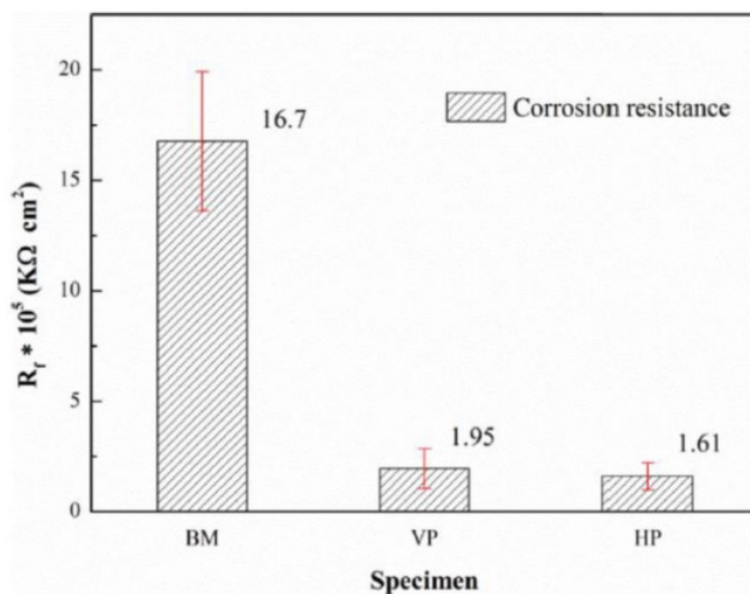


Рисунок 6 – Аналіз поляризаційних кривих та імпедансних діаграм [19]

Згідно з даними, наведеними у дослідженні Wu та ін. [19], зразки Ti-6Al-4V, виготовлені методом WAAM, продемонстрували кращі корозійні характеристики у 3,5 % розчині NaCl порівняно з гарячекатаними аналогами. Зокрема, щільність корозійного струму  $I_{\text{corr}}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) для WAAM-зразків становила  $154,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , тоді як для гарячекатаних —  $611,62 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Швидкість корозії  $R_{\text{corr}}$  (mm/year) відповідно становила  $3,43 \text{ mm}/\text{рік}$  та  $13,62 \text{ mm}/\text{рік}$ , що свідчить про понад чотириразове зменшення швидкості корозії у WAAM-зразків. Незначне зниження потенціалу корозії  $E_{\text{corr}}$  (V) для WAAM-зразків ( $-1,60 \text{ V}$  проти  $-1,56 \text{ V}$ ) не нівелює загальної переваги в корозійній стійкості. Крім того, Wu та ін. [19] відзначили анізотропію корозійної поведінки залежно від орієнтації побудови шарів: поверхні, перпендикулярні напрямку нарощування, демонстрували на 15–20 % нижчу щільність корозійного струму. Автори пояснюють це різною щільністю зерен  $\alpha$ -фази та орієнтацією  $\beta$ -фазових

меж, що впливають на формування пасивного шару. Також встановлено, що зони плавлення, утворені між шарами, мають більш однорідний оксидний шар, що сприяє підвищенню бар'єрних властивостей поверхні.

Отримані результати узгоджуються з аналізом мікроструктури, де WAAM-зразки демонстрували більш щільний та однорідний пасивний шар. Автори (Fang, X.), [20] також узагальнили вплив технологічних параметрів WAAM на схильність до корозії (табл. 3), де систематизовано ефекти струму, напруги, швидкості подачі дроту, швидкості переміщення та післяобробки. Таке узагальнення дозволяє підбирати режими на основі їх впливу на формування мікроструктури й дефектності, що сприяє підвищенню стійкості титанових виробів у морському середовищі.

Таблиця 3 – Розраховані корозійні параметри з поляризаційних кривих [20]

Зразок	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (V)	$R_{\text{corr}}$ (mm/year)
Гарячекатаний	611,62	-1,56	13,62
WAAM	154,12	-1,60	3,43

Згідно з узагальненими положеннями Lin та ін. (2021), WAAM-технологія має значний потенціал для виготовлення відповідальних титанових конструкцій, що збігається з даними експериментальних досліджень корозійної поведінки [21], підтверджуючи актуальність подальших досліджень з оптимізації структури WAAM-виробів.

#### 1.10 Експериментальна оцінка пасиваційних плівок на адитивно виготовлених титанових сплавах

Результати досліджень Kannan A.S., Clayton C.R. [23, 24] показали, що характеристики пасивних оксидних плівок є ключовим фактором, який формує корозійну стійкість титанових сплавів, отриманих адитивним виробництвом. За даними [23], застосування електрохімічної імпедансної спектроскопії дозволило встановити зростання опору переносу заряду у зразках з більш щільною мікроструктурою, що свідчить про ефективнішу пасивацію. Водночас, робота [24] показала, що оксидні плівки на поверхні адитивно виготовлених Ti-сплавів характеризуються меншою товщиною та неоднорідністю порівняно з традиційними аналогами, що обумовлює їх нижчу захисну здатність. Важливим практичним результатом є підтвердження позитивного впливу термічної обробки після друку, яка сприяє ущільненню структури оксидного шару та підвищенню його бар'єрних властивостей. Це дозволяє розглядати оптимізацію режимів друку та постобробки як ключовий інструмент для забезпечення стабільної корозійної поведінки титанових сплавів у морських умовах експлуатації.

За результатами електрохімічних випробувань [23], опір переносу заряду адитивно виготовлених Ti-сплавів зростав у 1,5–2 рази після оптимізації параметрів процесу, що свідчить про суттєве покращення пасиваційних властивостей оксидного шару. Узагальнені дані [24] підтверджують, що товщина та однорідність пасивних плівок у 3D-друкованих зразків є гіршими порівняно з традиційними матеріалами, однак проведення термічної обробки забезпечує підвищення корозійної стійкості на 25–40 %.

#### 1.11 Аналіз сучасних експериментальних підходів

У ряді сучасних досліджень [1–3] було проведено порівняння корозійної поведінки титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методами WAAM, SLM та традиційної обробки. Встановлено, що корозійна стійкість матеріалу значною мірою визначається мікроструктурою та рівнем дефектності, які залежать від технології виробництва та умов термічної обробки. Зразки, виготовлені методом WAAM, зазвичай демонструють прийнятну корозійну стійкість, тоді як SLM-зразки можуть мати більш високу дислокаційну щільність та внутрішні напруження, що впливає на електрохімічну поведінку. Оптимізація режимів друку та постобробки є ключовим фактором підвищення стійкості Ti-6Al-4V у морських умовах [Dai, 2016; Yang, 2017; Savchuk, 2020; Romero Reséndiz, 2024] [1, 2, 3, 28].

Поряд із механічними характеристиками важливо враховувати й корозійну поведінку матеріалу. У ряді сучасних досліджень проведено порівняння корозійної стійкості титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методами електронно-променевого плавлення (EBM) та селективного лазерного плавлення (SLM) після обробки гарячим ізостатичним пресуванням (HIP).

Зокрема, у роботі Reséndiz та ін. (2024) [28] показано, що зразки, отримані методом EBM, демонструють вищу корозійну стійкість порівняно з SLM-зразками. Це пояснюється більш однорідною

мікроструктурою та меншою кількістю дефектів у зразках ЕВМ. Автори відзначають, що SLM-зразки мають більшу пористість та внутрішні напруження, що сприяють підвищеній корозійній активності.

Узагальнюючи наведені результати, можна зазначити, що метод ЕВМ забезпечує кращу корозійну стійкість за умови оптимізації процесу виготовлення та післяобробки. Водночас метод SLM може демонструвати вищу або нижчу стійкість залежно від мікроструктурних особливостей та рівня дефектності.

Подібні результати підтверджують інші дослідження, де показано, що корозійна стійкість титанових сплавів Ti-6Al-4V значною мірою залежить від технології адитивного виробництва, умов термообробки та рівня внутрішніх дефектів [1, 2, 3, 28]. Зокрема, зразки, виготовлені методом WAAM або ЕВМ з подальшою оптимізованою термообробкою, демонструють більш однорідну мікроструктуру та зменшені внутрішні напруження, що сприяє підвищенню корозійної стійкості у морському середовищі.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.** У результаті проведеного аналізу встановлено, що технологія дротово-дугового адитивного виробництва (WAAM) титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, відкриває значні можливості для виготовлення великогабаритних конструкцій з підвищеною геометричною складністю для використання у морській галузі. Однак специфіка термічного циклу процесу зумовлює формування анізотропної мікроструктури, наявність зон повторного нагріву та дефектів, що безпосередньо впливає на електрохімічну поведінку матеріалу в умовах хлоридвмісного середовища.

Аналіз сучасних публікацій свідчить про підвищений науковий інтерес до питання корозійної стійкості WAAM-виробів. Дослідження поляризаційних характеристик, імпедансної відповіді та мікроструктури показують, що за належного добору параметрів процесу можливо досягти електрохімічних властивостей, порівнянних із традиційно обробленими сплавами. Перспективним напрямом є впровадження цілеспрямованих методів управління мікроструктурою шляхом термомеханічної або локалізованої термообробки, а також використання легуючих добавок для покращення пасиваційних властивостей поверхні.

Особливу увагу приділено порівнянню WAAM із іншими поширеними методами адитивного виробництва, зокрема селективним лазерним плавленням (SLM) та електронно-променевим плавленням (ЕВМ). Установлено, що WAAM забезпечує вищу продуктивність і придатність для виготовлення великогабаритних конструкцій, проте поступається за точністю та щільністю сформованої структури. Водночас зразки, виготовлені методами SLM і ЕВМ, демонструють кращу однорідність і вищу корозійну стійкість унаслідок дрібнозернистої структури, але менш придатні для морської важкої інженерії через обмеження за розмірами. Це порівняння дозволяє визначити доцільність застосування WAAM саме для суднобудівної галузі, за умов оптимізації процесу з урахуванням його специфіки.

У результаті огляду літературних джерел встановлено, що мікроструктура титанових сплавів, сформована під час адитивного виготовлення, значною мірою визначає їхню корозійну поведінку в умовах морського середовища. Зокрема, WAAM-технологія дозволяє отримати достатньо стійкі до корозії зразки, особливо після проведення термічної обробки. SLM-зразки демонструють вищу активність корозійних процесів через напруження та дефекти структури.

З метою покращення експлуатаційних характеристик титанових виробів, що застосовуються у суднобудуванні, доцільним є:

- оптимізація режимів термічної обробки після адитивного виготовлення;
- впровадження технологій легування для зменшення щільності корозійного струму;
- врахування особливостей структури, притаманних кожному з методів 3D-друку, при проектуванні відповідальних конструкцій.

Таким чином, результати аналізу підтверджують перспективність застосування адитивних технологій для виготовлення титанових деталей, що працюють у морському середовищі, за умов грамотного контролю структури та постобробки.

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці уніфікованих критеріїв оцінювання корозійної стійкості WAAM-деталей, з урахуванням умов морської експлуатації, впливу гідродинамічного навантаження, біозабруднення та дії перемінних потенціалів. Важливим також є вдосконалення технологій постобробки поверхні, зокрема використання лазерної обробки, механічного шліфування та покриттів, що підвищують довговічність конструкцій на водному транспорті.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Dai N., Zhang L.-C., Zhang J., Chen Q., Wu M. Corrosion behavior of selective laser melted Ti 6Al 4V alloy in NaCl solution // *Corrosion Science*. – 2016. – Vol. 102. – P. 484–489. – DOI: 10.1016/j.corsci.2015.10.041. [in English]
2. Yang J., Yang H., Yu H., Wang Z., Zeng X. Corrosion behavior of additively manufactured Ti 6Al 4V alloy in NaCl solution // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2017. – Vol. 48. – P. 3583–3593. – DOI: 10.1007/s11661-017-4087-9. [in English]
3. Савчук В.В., Петренко І.М., Іваненко Л.П. Корозійна стійкість титанових сплавів у морському середовищі: монографія. – Київ : Наукова думка, 2020. – 256 с.
4. Шевчук І.В., Петренко О.М., Коваленко С.П. Матеріалознавство суднобудування: проблеми корозії та зносостійкості // *Вісник суднобудування*. – 2020. – № 3. – С. 45–52.
5. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубєва С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин судових ГРЩ // *Водний транспорт*. – 2021. – № 3 (34). – С. 13–21.
6. Кириченко О.С. Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. – 2023. – Т. 34 (73). – № 1. – С. 256–263. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>.
7. Yadav S., Mukherjee M., Singh D. Review of current challenges in the implementation of WAAM for Ti-6Al-4V alloys // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – P. 2103–2130, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13958-1>.
8. Bermingham M.J., Nicastro L., Kent D., Chen Y., and Dargusch M.S. Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. – 753, 15 July. – P. 247-255 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.158>[in English].
9. Fernandez L., and Martinez J. Laser surface treatment combined with anodizing for enhanced corrosion resistance of additively manufactured titanium alloys // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. – 2023. – Vol. 58, № 3. – P. 245–256. – DOI:<https://doi.org/10.1080/1478422X.2023.2177461>. [in English].
10. Wang, Z., and Li, Q. Electrochemical evaluation of corrosion resistance in AM titanium alloys under simulated marine conditions // *Electrochimica Acta*, 2020. – 337, 135710. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135710>[in English].
11. Kim, Y., and Choi, S. Accelerated corrosion testing of WAAM Ti-6Al-4V using electrochemical impedance spectroscopy // *Materials and Design*. 2019. – 180, 107947. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107947>[in English].
12. Shao, Z., Wu, B., Li, P., Ma, W., Tan, H., & Li, H. Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation // *Materials Characterization*. 2023. 199–112844. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112844>[in English].
13. Yu, Z., Chen, Z., Qu, D., Qu, S., Wang, H., Zhao, F., Zhang, C., Feng, A., and Chen, D. (2022). Microstructure and electrochemical behavior of a 3D-printed Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 15(13), 4473. <https://doi.org/10.3390/ma15134473>[in English].
14. Alvarez, J.F.F., Gomez, F.J.R., Bustamante, E.O., and Llongueras, J.G. Study of the electrochemical behavior of a Ti6Al4V alloy modified by heat treatment and chemical conversion // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. 315, 498–508. [in English].
15. Longhitano G.A., Arenas M.A., Conde A., Larosa M.A., Jardini A.L., Zavaglia C.A. de C. and Damborenea J.J. Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing // *Journal of Alloys and Compounds*, 2018. – 765, P. 961–968; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.319> [in English].
16. Yun Bai, Xin Gai, Shujun Li, Lai-Chang Zhang, Yujing Liu, Yulin Hao, Xing Zhang, Rui Yang, and Yongbo Gao Improved corrosion behaviour of electron beam melted Ti-6Al-4V alloy in phosphate buffered saline // *Corrosion Science*. 2017. – 123, 15, P. 289-296, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.05.003> [in English].
17. Zhan Z., Zhang Q., Wang S., Liu X., Zhang H., Sun Z., Ge Y. and Du N., Comparison on the Electrochemical Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion and Casting // *Materials*, 2024. – 17(13), 3322; <https://doi.org/10.3390/ma17133322> [in English].
18. Marques, D. A., Oliveira, J. P., and Baptista, A. C. A short review on the corrosion behaviour of wire and arc additive manufactured materials // *Metals*, 2023. – 13(4), 641. <https://doi.org/10.3390/met13040641>[in English].
19. Wu B., Pan Z., Li S., Cuiuri D., Ding D., and Li H. The anisotropic corrosion behaviour of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution // *Corrosion Science*, 2018. – 137, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.047> [in English].

20. Fang, X., Yang, J.-N., Wang, S., Wang, C., Huang, K., Li, H., and Lu, B. Additive manufacturing of high performance AZ31 magnesium alloy with full equiaxed grains: Microstructure, mechanical property, and electromechanical corrosion performance // *Journal of Materials Processing Technology*, 2022. – 200, 117430. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117430> [in English].
21. Lin, Z., Song K., and Yu X. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy // *Journal of Manufacturing Processes* (2021). – 70(3), 24–45 DOI:10.1016/j.jmapro.2021.08.018 [in English].
22. Jin, B., Wang, Q., Zhao, L., Pan, A., Ding, X., Gao, W., Song, Y., and Zhang, X. A review of additive manufacturing techniques and post-processing for high-temperature titanium alloys // *Metals*, 2023. – 13(8), 1327. <https://doi.org/10.3390/met13081327>[in English].
23. Kannan A.S., Gopi D., Kavitha L., and Surendiran M. Electrochemical impedance spectroscopic analysis of passive films formed on titanium alloys processed by additive manufacturing // *Journal of Electrochemical Science and Technology*. 2019. - 10(2), 123–132. <https://doi.org/10.5229/JECST.2019.10.2.123>[in English].
24. Clayton C.R., Lu Y., and Rao G. Passive film structure and its relationship to corrosion resistance of Ti alloys fabricated by 3D printing technologies // *Corrosion Reviews*, (2020). - 38(4), 365–378. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0024>[in English].
25. Hemmasian Etefagh, Ali, Corrosion Performance of Additively Manufactured Alloys and Hot Corrosion (2021). LSU Doctoral Dissertations. 5452. [https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool\\_dissertations/5452](https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/5452)[in English].
26. Zhao X., Li S., Zhang M., Liu Y., Sercombe T., Wang S., Hao Y., Yang R., and Murr L.E. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting, *Materials and Design*, 2016. - 95, no 11. - P. 21–31 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.135>[in English].
27. Ali Hemmasian Etefagh Corrosion behavior of Additively Manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post. 18th MIE Graduate Student Conference April 6, 2019. P. 21–22.
28. Liliana Romero Reséndiz, Tonantzin Sánchez Cano, Muhammad Naeem, Asif Ur Rehman, Elmas Salamci, Vianey Torres Mendoza, Eduardo Degalez Duran, Lourdes Bazán Díaz & Metin U. Salamci Mechanical and Electrochemical Properties Comparison of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloys by Electron Beam Melting and Selective Laser Melting // *Journal of Materials Engineering and Performanc.* 2024 Volume 33. – P. 9028–9038, <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09486-4>[in English].
29. Wenbin Qiu, Yongqiang Wei Aijun Chen, Hao Deng, Lvjun Zhou, Hanyang Zuo, Longqing Chen, Zuxi Xia, Hui Wangd and Jun Tang Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V in sulfamic acid cleaning solution // *New Journal of Chemistry*, 2025 45, 12345–12356. <https://doi.org/10.1039/D5NJ02817E>[in English].
30. Hugo Mora-Sanchez, Miguel Collado-Vian, Marta Mohedano, Raúl Arrabal and Endzhe Matykina Corrosion of an Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy in Saline and Acidic // *Media Materials* 2024, 17(3), 712. <https://doi.org/10.3390/ma17030712>[in English].

## REFERENCES

1. Dai, N., Zhang, L.-C., Zhang, J., Chen, Q., and Wu, M. (2016). Corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution. *Corrosion Science*, 102, 484–489. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.041>[in English].
2. Yang, J., Yang, H., Yu, H., Wang, Z., and Zeng, X. (2017). Corrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 3583–3593. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4087-9>[in English].
3. Savchuk, V. V., Petrenko, I. M., and Ivanenko, L. P. (2020). Korozijna stijkist' tytanovykh splaviv u mors'komu seredovyshchi [Corrosion resistance of titanium alloys in the marine environment]. Kyiv: *Naukova Dumka*, 2020. – 256 p. [in Ukrainian].
4. Shevchuk, I. V., Petrenko, O. M., and Kovalenko, S. P. (2020). Materialoznavstvo sudnobuduvannia: problemy koroziji ta znosostijkosti [Materials Science in Shipbuilding: Problems of Corrosion and Wear Resistance]. *Visnyk Sudnobuduvannia* (Bulletin of Shipbuilding), (3), 45–52. [in Ukrainian].
5. Taranenko, S. V., Kyrychenko, O. S., Kolesnyk, V. V., Kostiuchenko, V. I., Prystupa, S. V., Pastukh, O. V., and Holubieva, S. M. (2021). Modeliuvannia statsionarnoho teplovoho polia strumoprovodnykh shyn sudnovykh HRSH [Modeling of the stationary thermal field of current-carrying busbars of shipboard main switchboards]. *Vodnyi Transport*, (3)34, 13–21. [in Ukrainian].
6. Kyrychenko, O. S. (2023). Porivnialnyi analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznymy heometrychnymy formamy napivprovodnykiv dlia elektrobladnannia transportu [Comparative analysis of characteristics of thermoelectric modules with different geometric shapes of semiconductors for transport electrical equipment]. *Scientific*

*Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 34(73)1, 256–263. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39> [in Ukrainian].

7. Yadav S., Mukherjee M. and Singh D. (2024). Review of current challenges in the implementation of WAAM for Ti-6Al-4 V alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133, P. 2103–2130, DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13958-1> [in English].

8. Bermingham M.J., Nicastro L., Kent D., Chen Y., and Dargusch M.S. (2018). Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 753, 15, P. 247-255 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.158> [in English].

9. Fernandez L., and Martinez J. (2023). Laser surface treatment combined with anodizing for enhanced corrosion resistance of additively manufactured titanium alloys *Corrosion Engineering. Science and Technology*. Vol. 58, no 3. P. 245–256. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2023.2177461>. [in English].

10. Wang, Z., and Li, Q. (2020). Electrochemical evaluation of corrosion resistance in AM titanium alloys under simulated marine conditions. *Electrochimica Acta*, 337, 135710. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135710> [in English].

11. Kim, Y., and Choi, S. (2019). Accelerated corrosion testing of WAAM Ti-6Al-4V using electrochemical impedance spectroscopy. *Materials and Design*, 180, 107947. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107947> [in English].

12. Shao, Z., Wu, B., Li, P., Ma, W., Tan, H., & Li, H. (2023). Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation. *Materials Characterization*, 199, 112844. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112844> [in English].

13. Yu, Z., Chen, Z., Qu, D., Qu, S., Wang, H., Zhao, F., Zhang, C., Feng, A., and Chen, D. (2022). Microstructure and electrochemical behavior of a 3D-printed Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 15(13), 4473. <https://doi.org/10.3390/ma15134473> [in English].

14. Alvarez, J.F.F., Gomez, F.J.R., Bustamante, E.O., and Llongueras, J.G. (2017). Study of the electrochemical behavior of a Ti6Al4V alloy modified by heat treatment and chemical conversion. *Surface and Coatings Technology*, 315, 498–508. [in English].

15. Longhitano G.A., Arenas M.A., Conde A., Larosa M.A., Jardini A.L., Zavaglia C.A. de C. and Damborenea J.J., (2018). Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing, *Journal of Alloys and Compounds*, 765, P.961–968; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.319> [in English].

16. Yun Bai, Xin Gai, Shujun Li, Lai-Chang Zhang, Yujing Liu, Yulin Hao, Xing Zhang, Rui Yang, and Yongbo Gao (2017). Improved corrosion behaviour of electron beam melted Ti-6Al-4V alloy in phosphate buffered saline. *Corrosion Science*, 123, 15, P. 289-296, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.05.003> [in English].

17. Zhan Z., Zhang Q., Wang S., Liu X., Zhang H., Sun Z., Ge Y. and Du N. (2024). Comparison on the Electrochemical Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion and Casting, *Materials*, 17(13), 3322; <https://doi.org/10.3390/ma17133322> [in English].

18. Marques, D. A., Oliveira, J. P., and Baptista, A. C. (2023). A short review on the corrosion behaviour of wire and arc additive manufactured materials. *Metals*, 13(4), 641. <https://doi.org/10.3390/met13040641> [in English].

19. Wu B., Pan Z., Li S., Cuiuri D., Ding D., and Li H. (2018). The anisotropic corrosion behaviour of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution. *Corrosion Science*, 137, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.047> [in English].

20. Fang, X., Yang, J.-N, Wang, S., Wang, C., Huang, K., Li, H., and Lu, B. (2022). Additive manufacturing of high performance AZ31 magnesium alloy with full equiaxed grains: Microstructure, mechanical property, and electromechanical corrosion performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 200: 117430. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117430> [in English].

21. Lin, Z., Song K., and Yu X. (2021). A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 70(3), 24-45 DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.08.018](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018) [in English].

22. Jin, B., Wang, Q., Zhao, L., Pan, A., Ding, X., Gao, W., Song, Y., and Zhang, X. (2023). A review of additive manufacturing techniques and post-processing for high-temperature titanium alloys. *Metals*, 2023, 13(8), 1327. <https://doi.org/10.3390/met13081327> [in English].

23. Kannan A.S., Gopi D., Kavitha L., and Surendiran M. (2019). Electrochemical impedance spectroscopic analysis of passive films formed on titanium alloys processed by additive manufacturing. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 10(2), 123–132. <https://doi.org/10.5229/JECST.2019.10.2.123> [in English].

24. Clayton C.R., Lu Y., and Rao G. (2020). Passive film structure and its relationship to corrosion resistance of Ti alloys fabricated by 3D printing technologies. *Corrosion Reviews*, 38(4), 365–378. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0024> [in English].

25. Hemmasian Etefagh, Ali, Corrosion Performance of Additively Manufactured Alloys and Hot Corrosion (2021). LSU Doctoral Dissertations. 5452. [https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool\\_dissertations/5452](https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/5452)[in English].
26. Zhao X., Li S., Zhang M., Liu Y., Sercombe T., Wang S., Hao Y., Yang R., and Murr L.E. (2016). Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting, *Materials and Design*, 95, no 11. P. 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.135>[in English].
27. Ali Hemmasian Etefagh (2019). Corrosion behavior of Additively Manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post. 18th MIE Graduate Student Conference April 6, 2019. P.21-22. [in English].
28. Liliana Romero Reséndiz, Tonantzin Sánchez Cano, Muhammad Naem, Asif Ur Rehman, Elmas Salamci, Vianey Torres Mendoza, Eduardo Degalez Duran, Lourdes Bazán Díaz & Metin U. Salamci (2024). Mechanical and Electrochemical Properties Comparison of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloys by Electron Beam Melting and Selective Laser Melting. *Journal of Materials Engineering and Performanc.* Vol. 33, P. 9028–9038, <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09486-4>[in English].
29. Wenbin Qiu, Yongqiang Wei Aijun Chen, Hao Deng, Lvjun Zhou, Hanyang Zuo, Longqing Chen, Zuxi Xia, Hui Wangd and Jun Tang (2025). Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V in sulfamic acid cleaning solution. *New Journal of Chemistry*, 45, 12345–12356. <https://doi.org/10.1039/D5NJ02817E>[in English].
30. Hugo Mora-Sanchez, Miguel Collado-Vian, Marta Mohedano, Raúl Arrabal and Endzhe Matykina (2024). Corrosion of an Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy in Saline and Acidic. *Media Materials*, 17(3), 712. <https://doi.org/10.3390/ma17030712>[in English].

*Kyrylakha S.V., Kapustian O.Ye.*

## PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED TITANIUM ALLOYS FOR MARINE TRANSPORT COMPONENTS

This article analyzes current scientific approaches to investigating the corrosion behavior of titanium alloys produced by additive manufacturing, specifically wire arc additive manufacturing (WAAM), in marine environments. Special attention is given to the influence of WAAM process parameters on the material's microstructure, passive film formation, and corrosion resistance, which determine the feasibility of using such components in shipbuilding and related industries. The high specific strength, low density, and excellent corrosion resistance promote the active implementation of titanium materials in marine and aerospace structural applications. However, the microstructure and properties of parts fabricated by different additive technologies (WAAM, SLM, EBM) significantly differ from those of conventionally processed materials. The article systematizes experimental data on the effects of microstructure, specimen orientation, thermal regimes, and printing parameters on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V in NaCl solution. Particular emphasis is placed on comparing the electrochemical characteristics of WAAM parts with forged counterparts, as well as modeling impedance parameters using equivalent electrical circuits. The main mechanisms of passive layer degradation associated with structural heterogeneity and the presence of reheated zones are outlined. Examples of titanium components for marine transport, such as flanges, hull elements, propeller assemblies, and pumps, are presented. The importance of developing optimized WAAM printing regimes to ensure the durability of titanium products in saline water is highlighted. The results obtained can be applied to improve the corrosion resistance of marine structures made from additive titanium alloys by controlling technological parameters and subsequent heat treatment. A comparative analysis of polarization and impedance test results demonstrated that WAAM samples exhibit lower corrosion resistance compared to forged ones due to microstructural features. Nevertheless, process parameter optimization can reduce corrosion rates by more than threefold compared to hot-rolled analogs.

**Keywords:** *titanium alloys; WAAM; additive manufacturing; corrosion resistance; marine environment; electrochemical properties; microstructure; SLM; EBM; impedance spectroscopy.*

Стаття прийнята 20.08.2025