

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут (факультет)

Кафедра матеріалознавства і технології металів

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

Дубовий О.М.

« 14 » 06 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему : «Аналіз технології напилення електродугових покриттів для захисту від кавітаційного зношування деталей суднобудування»

Виконав: студент 4131 групи

Жарков Д.Д. Жарков Д.Д.

Керівник роботи:

к.т.н., доцент без вч. звання

Бобров М.М. Бобров М.М.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут (факультет): Кораблебудівний

Кафедра: Матеріалознавства і технології металів

Спеціальність: «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

Освітня програма: «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

к.т.н., доц. Лебедєва Н.Ю.

« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Студенту Жарков Даніл Денисович

1. Тема роботи: «Аналіз технології напилення електродугових покриттів для захисту від кавітаційного зношування деталей суднобудування».

Керівник роботи: к.т.н., доцент без вч. звання Бобров М.М.

Затверджені наказом ректора № від « » 2025 року №

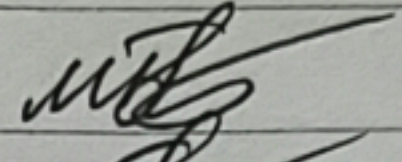
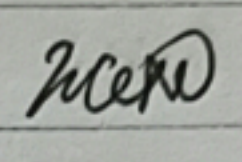
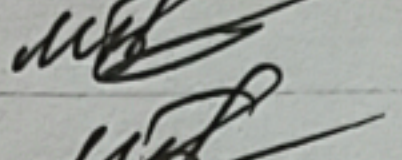
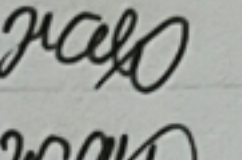
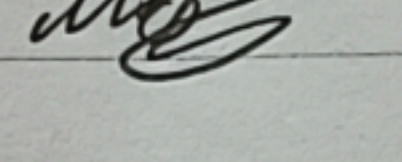
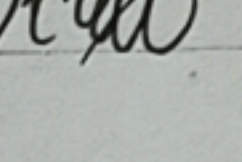
2. Термін подання роботи: «26» серпня 2025 року.

3. Вихідні дані по роботі: Дослідити можливість використання електродугового напилення для відновлення та зміцнення деталей суднобудування, що піддаються кавітаційному зношуванню. Дослідити та запропонувати обладнання та матеріали для напилення покриттів. Провести експериментальні дослідження мікроструктури, твердості, зносостійкості та поведінки покриттів при впливі корозійного середовища.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів): 1. Аналіз сучасного стану та перспектив нанесення захисних покриттів для деталей суднобудування та судноремонту. 2. Вибір обладнання та напилюваних матеріалів. Аналіз мікроструктури сформованих покриттів. 3. Визначення властивостей сформованих електродугових захисних покриттів.

5. Перелік презентаційних матеріалів, плакати: 1. Титульний лист; 2. Актуальність теми дослідження; 3. Мета та постановка задачі дипломної роботи; 4. Результати вибору обладнання та напилюваних матеріалів; 5. Результати дослідження мікроструктури покриттів; 6. Результати визначення мікротвердості та міцності зчеплення покриттів з основою; 7. Результати дослідження корозійної стійкості покриттів; 8. Результати визначення зносостійкості покриттів; 9. Загальні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
2	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
3	Бобров М.М., к.т.н., доцент		

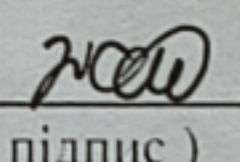
7. Дата видачі завдання: “ ” 2025 року.

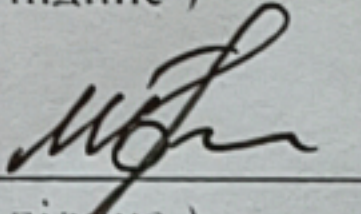
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасного стану та перспектив нанесення захисних покриттів для деталей суднобудування та судноремонту	20.04.2025	Виконано
2	Вибір обладнання та напильованих матеріалів. Аналіз мікоструктури сформованих покриттів	20.05.2025	Виконано
3	Визначення властивостей сформованих електродугових захисних покриттів.	20.06.2024	Виконано

Студент

Керівник роботи

 Жарков Д.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

 Бобров М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут (факультет)

Кафедра матеріалознавства і технології металів

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

Дубовий О.М.

«_____» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

**на тему : «Аналіз технології напилення електродугових покриттів для
захисту від кавітаційного зношування деталей суднобудування»**

Виконав: студент 4131 групи

_____ Жарков Д.Д.

Керівник роботи:

к.т.н., доцент без вч. звання

_____ ***Бобров М.М.***

Анотація

У кваліфікаційній роботі розглянуто актуальну тему захисту деталей суднових механізмів від кавітаційного зношування за допомогою електродугового напилення. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ресурсу експлуатації суден, що часто стикаються з проблемами кавітаційної ерозії на таких елементах, як гребні гвинти, рульові пристрої та гідродинамічні частини корпусу. У вступі обґрунтовано важливість застосування технологій відновлення та зміцнення деталей у судноремонтному виробництві, а також визначено мету роботи – аналіз та дослідження технології електродугового напилення для підвищення довговічності деталей суднових механізмів. Перший розділ роботи містить огляд сучасних технологій нанесення захисних покриттів, серед яких виділено газотермічне та електродугове напилення як економічно вигідні та ефективні методи відновлення. Особливу увагу приділено проблемі кавітаційного зношування, його механізмам та впливу на деталі суднових механізмів. У другому розділі обґрунтовано вибір обладнання для проведення напилення і матеріалів – алюмінієві та бронзові дроти марок ER4043, ER4047, БрАЖН 9-4-4. Проведено дослідження мікроструктури отриманих покриттів, зокрема визначено пористість та характер формування структурних елементів. У третьому розділі визначено механічні та експлуатаційні властивості сформованих покриттів: мікротвердість, міцність зчеплення з основою, зносостійкість та корозійну стійкість. Встановлено, що алюмінієві покриття мають меншу пористість і вищу міцність зчеплення з основою у порівнянні з бронзовими. Найвищу міцність зчеплення забезпечує покриття з дроту Al-5Si, а бронзове покриття володіє високою твердістю, що робить його перспективним для захисту найбільш навантажених деталей. У висновках підбито підсумки досліджень та сформульовано рекомендації щодо вибору матеріалів і умов напилення залежно від експлуатаційних вимог. Отримані результати мають практичне значення для впровадження сучасних технологій у судноремонтному виробництві, сприяючи підвищенню ресурсу та надійності суден.

Ключові слова: електродугове напилення, корозійна стійкість, бронзове покриття, кавітація, міцність зчеплення

Abstract

In the qualification thesis, the relevant topic of protecting ship machinery components from cavitations' wear through electric arc spraying is considered. The relevance of the research is due to the need to extend the operational life of ships, which often face cavitations erosion problems on elements such as propellers, rudders, and hydrodynamic hull parts. The introduction substantiates the importance of applying restoration and strengthening technologies in ship repair production and defines the objective of the work – to analyze and investigate the electric arc spraying technology for improving the durability of ship machinery components. The first chapter provides an overview of modern protective coating technologies, highlighting gas-thermal and electric arc spraying as economically viable and effective restoration methods. Special attention is paid to the problem of cavitation wear, its mechanisms, and its impact on ship machinery parts. The second chapter justifies the choice of equipment for spraying and the selection of materials – aluminum and bronze wires of grades ER4043, ER4047, and БрАЖН 9-4-4. The microstructure of the obtained coatings was investigated, in particular the porosity and the formation character of structural elements.

The third chapter defines the mechanical and operational properties of the formed coatings: microhardness, adhesion strength, wear resistance, and corrosion resistance. It was established that aluminum coatings have lower porosity and higher adhesion strength compared to bronze coatings. The highest adhesion strength is provided by the Al-5Si wire coating, while the bronze coating has a high hardness, making it promising for protecting the most heavily loaded components. In the conclusions, the results of the study are summarized, and recommendations are formulated regarding the choice of materials and spraying conditions depending on the operational requirements. The results obtained have practical significance for the implementation of modern technologies in ship repair production, contributing to the extension of the service life and reliability of ships.

Keywords: electric arc spraying, corrosion resistance, bronze coating, cavitation, bond strength.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут (факультет): Кораблебудівний

Кафедра: Матеріалознавства і технології металів

Спеціальність: «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

Освітня програма: «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

_____ к.т.н., доц. Лебедева Н.Ю.

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Студенту Жарков Даніл Денисович

1. Тема роботи: «Аналіз технології напилення електродугових покриттів для захисту від кавітаційного зношування деталей суднобудування».

Керівник роботи: к.т.н., доцент без вч. звання Бобров М.М.

Затверджені наказом ректора № _____ від “___” _____ 2025 року № _____

2. Термін подання роботи: “___” _____ 2025 року.

3. Вихідні дані по роботі: Дослідити можливість використання електродугового напилення для відновлення та зміцнення деталей суднобудування, що піддаються кавітаційному зношуванню. Дослідити та запропонувати обладнання та матеріали для напилення покриттів. Провести експериментальні дослідження мікроструктури, твердості, зносостійкості та поведінки покриттів при впливі корозійного середовища.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів): 1. Аналіз сучасного стану та перспектив нанесення захисних покриттів для деталей суднобудування та судноремонту. 2. Вибір обладнання та напилюваних матеріалів. Аналіз мікроструктури сформованих покриттів. 3. Визначення властивостей сформованих електродугових захисних покриттів.

5. Перелік презентаційних матеріалів, плакати: 1. Титульний лист; 2. Актуальність теми дослідження; 3. Мета та постановка задачі дипломної роботи; 4. Результати вибору обладнання та напилюваних матеріалів; 5. Результати дослідження мікроструктури покриттів; 6. Результати визначення мікротвердості та міцності зчеплення покриттів з основою; 7. Результати

дослідження корозійної стійкості покриттів; 8. Результати визначення зносостійкості покриттів; 9. Загальні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
2	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
3	Бобров М.М., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання: “___” _____ 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасного стану та перспектив нанесення захисних покриттів для деталей суднобудування та судноремонту	20.04.2025	
2	Вибір обладнання та напилюваних матеріалів. Аналіз мікоструктури сформованих покриттів	20.05.2025	
3	Визначення властивостей сформованих електродугових захисних покриттів.	20.06.2024	

Студент

_____ Жарков Д.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Бобров М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Реферат	7
Перелік умовних скорочень.....	8
ВСТУП.....	9
Розділ 1. Аналіз сучасного стану та перспектив нанесення захисних покриттів для деталей суднобудування та судноремонту	10
1.1. Технології захисту, зміцнення та відновлення деталей в суднобудуванні та судноремонті.....	10
1.2. Проблеми кавітаційного зношування суднових деталей	16
1.3. Застосування газотермічних методів напилення для вирішення проблем зносу суднових деталей	19
1.6. Висновки і постановка задач кваліфікаційної роботи бакалавра ...	25
Розділ 2. Вибір обладнання та напилюваних матеріалів. Аналіз мікроструктури сформованих покриттів	27
2.1. Вибір установки для електродугового напилення	27
2.2. Вибір напилюваних матеріалів	28
2.2.1. Сплави на основі алюмінію	28
2.2. Сплави на основі міді	29
2.3. Дослідження мікроструктури отриманих покриттів	31
3. Визначення властивостей сформованих електродугових захисних покриттів.....	34
3.1 Мікротвердість покриттів	34
3.2. Міцність зчеплення покриттів з основою	35
3.3 Зносостійкість покриттів.....	37
3.4 Корозійна стійкість покриттів	39
Загальні висновки по роботі	41
Список використаних джерел.....	42

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: 43 аркуші, 3 частини, 13 рисунків, 5 таблиць, 9 плакатів, 43 джерела.

Мета дипломної роботи – проаналізувати технологію напилення електродугових покриттів для захисту від кавітаційного зношування деталей суднобудування.

Методи дослідження – комп'ютерна металографія, механічні та корозійні випробування.

Показано, що досить серйозною проблемою судових деталей судна є кавітаційне зношування, що пов'язано з утворенням ударних хвиль та виникненням мікроструменів під час колапсу бульбашок в асиметричному полі тисків. Для відновлення та зміцнення деталей суднобудування запропоновано використовувати електродугове напилення, що пояснюється високою продуктивністю та простотою даного методу. Для формування покриттів рекомендовано використання алюмінієвих та бронзового дротів марок ER4043 (Al5Si), ER4047(Al12Si) та БрАЖН 9-4-4. Підготовлено зразки вказаних покриттів та досліджено їх мікроструктуру. Встановлено, що покриття на основі алюмінієвого дроту володіють меншою пористістю (7-8 %) у порівнянні з бронзовими покриттями (12%), що пояснюється більш активним окисненням міді та гіршим заповненням покриття напилюваними частинками. За допомогою експериментальних досліджень показано, що найвища міцність зчеплення покриттів з основою спостерігається для покриття з дроту Al-5Si (22МПа) при підвищенні кількості кремнію до 12% вказана характеристика дещо знижується до 20 МПа. Бронзові покриття характеризується міцністю зчеплення на рівні 13 МПа. Проведено дослідження зносостійкості на корозійної стійкості покриттів зі вказаних матеріалів на їх основі рекомендовано використовувати алюмінієві покриття для ненавантажених деталей рульового пристрою судна, бронзові для більш відповідальних – наприклад, відновлення та зміцнення гвинта.

ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПИЛЕННЯ, КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ, БРОНЗОВЕ ПОКРИТТЯ, КАВІТАЦІЯ, МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СММ – суднові машини та механізми;

ГТН – газотермічне напилення;

ЕКПП – електроконтактне припікання покриттів;

ЕДН – електродугове напилення;

HVOF – high velocity oxygen fuel spraying;

NIMS – National Institute of Material Science;

NAB – nickel aluminium bronze;

$\sum V_{\alpha}$ – доля фази α у сплаві або сумарний об'єм усіх мікрочастинок цієї фази в одиниці об'єму мікроструктури, $\text{мм}^3/\text{мм}^3$;

$\sum F_{\alpha}$ – середня сумарна величина площі, що зайнята фазою α на одиниці площі двовірної структури, $\text{мм}^2/\text{мм}^2$;

$\sum h_{\alpha}$ – середня сумарна довжина відрізків, що проходять по фазі α , на одиницю довжини січної, $\text{мм}/\text{мм}$;

$\sum z_{\alpha} / z$ – середнє сумарне відношення точок.

ВСТУП

Технічна експлуатація суден зі зношеними корпусними конструкціями і технічними засобами вимагає особливої відповідальності і уваги для запобігання аварійних виходів з ладу технічних засобів і забезпечення безпеки плавання. Судноремонт є важливою частиною судноплавства. Роботи по ремонту на суднобудівних заводах складають приблизно 25%. Роботи з переобладнання і ремонту іноді є більш рентабельними, ніж будівництво нових суден. Обсяги ремонтних робіт для підтримки працездатності суден з кожним роком збільшуються, так як більшість з них перебуває в експлуатації понад 20 років. Багаторічний досвід експлуатації і ремонту показує, що в більшості випадків причиною несправностей у вузлах агрегатів судових машин і механізмів (СММ) і вихід їх з ладу є знос деталей. Такий стан справ призводить до появи дефіциту запасних частин, збільшення вартості і тривалості ремонту СММ. Тому відновлення деталей при одночасному підвищенні їх ресурсу - важливий резерв розвитку ремонтного виробництва, підвищення його ефективності.

Одночасно з дією корозійного середовища на деталі судна стає питання щодо їх захисту від кавітаційного зношування, що активно діє на гребні гвинти, рульові пристрої та інші гідродинамічні складові корпусу. Найбільш ефективно і сучасне рішення цієї проблеми – утворення поверхневого шару, що контактує із зовнішнім середовищем за рахунок газотермічного напилення (ГТН).

Таким чином, актуальним є дослідження щодо аналізу технології електродугового напилення, що характеризується низькою вартістю та найвищою продуктивністю, для формування захисних та відновлювальних покриттів від кавітаційного зношування деталей суднобудування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СУДНОБУДУВАННЯ ТА СУДНОРЕМОНТУ

1.1. Технології захисту, зміцнення та відновлення деталей в суднобудуванні та судноремонті

Сучасне судно, незалежно від його призначення (перевезення вантажів по морях і океанах або по внутрішніх водних шляхах, вилов і переробка морепродуктів, видобуток вуглеводнів або інших корисних копалин, проведення науково-дослідних робіт), являє собою складне інженерне споруда, призначена для автономного плавання, в тому числі, в екстремальних гідрометеорологічних умовах.

На жаль, перехід на ринкову економіку мав негативні наслідки: судна і їх технічні засоби почали експлуатуватися на "знос" при не завжди виправданому скороченні чисельності суднових екіпажів; вкрай скоротилося надходження нових сучасних суден; більшість суден, що знаходяться в експлуатації, мають граничний вік [1]. Технічна експлуатація суден з зношеними корпусними конструкціями і технічними засобами вимагає особливої відповідальності та уваги для запобігання аварійних виходів з ладу технічних засобів і забезпечення безпеки плавання. Необхідно приділяти увагу оцінці теплової та механічної напруженості двигунів, питань технічного використання головних двигунів різних конструкцій з обмежувальними характеристиками з метою запобігання аварій суднових дизелів [2]. З метою забезпечення працездатності, надійності, економічності та безпеки судна в процесі експлуатації екіпаж судна і берегові служби повинні здійснювати його технічне обслуговування та ремонт [3].

Судноремонт є важливою частиною судноплавства. Роботи по ремонту на суднобудівних заводах становлять приблизно 25% [4]. Звичайний ремонт суден може тривати від 3 днів до 2 місяців, в той час як більш важливі типи ремонту і переобладнання можуть тривати більше року. Роботи з переобладнання та

ремонту іноді є більш рентабельними, ніж будівництво нових суден. Процес судноремонту багато в чому схожий з суднобудуванням, за винятком того, що він є менш масштабним і виконується більш швидкими темпами. Обсяги ремонтних робіт для підтримки працездатності судів з кожним роком збільшуються, так як більшість суден перебуває в експлуатації більше 20 років [5]. У теперішній час технологічне забезпечення судноремонтного виробництва в деяких випадках не відповідає сучасним технологічним, економічним та екологічним вимогам, викликає необхідність відбракування деталей у зв'язку з неможливістю їх відновлення. Це створює дефіцит запасних частин, підвищує матеріальні витрати на ремонт, збільшує його тривалість [5, 6].

Багаторічний досвід експлуатації та ремонту показує, що в більшості випадків причиною несправностей у вузлах агрегатів судових машин і механізмів (СММ) і вихід їх з ладу є знос деталей [5]. У вузлів і агрегатів СММ відбуваються механічні, фізичні, хімічні процеси, викликають пошкодження і руйнування поверхонь. Основною причиною руйнування деталей є зовнішнє тертя, яке призводить до інтенсивного зносу, пошкодження поверхонь, втрати потужності і зменшення надійності і довговічності механізмів в цілому. Аналіз статистичних даних по дефектах і несправності деталей СММ при виконанні капітального ремонту показує, що значна кількість деталей відновлюється різними методами [6, 7], однак частина бракується через неприпустимо зносу і відсутності технологій їх відновлення. Номенклатура таких деталей дуже широка, а кількість їх становить близько 22% від кількості продефектованих деталей.

Щороку на судноремонтних підприємствах відновлюється і ремонтується 75 ... 80 % зношених деталей СММ шляхом заповнення втрати металу на зношених ділянках і навіть надання робочій поверхні спеціальних властивостей [7]. Відновлення деталей при одночасному підвищенні їх ресурсу-важливий резерв розвитку ремонтного виробництва, підвищення його ефективності. Використання відновлених деталей дозволяє зменшити витрати судноремонтних підприємств на запасні частини, зберегти велику кількість

металу. Впровадження технологічних процесів обмежується відсутністю науково обґрунтованих рекомендацій щодо їх застосування при відновленні деталей СММ. Існуючі методики відновлення і зміцнення деталей, СММ в ряді випадків, не відповідають існуючим вимогам, так як вони не дозволяють комплексно враховувати експлуатаційні, екологічні та економічні вимоги.

Серед існуючих способів відновлення і зміцнення найбільшу частину займають зварювальні технології. Зварювання-один з основних технологічних процесів з'єднання деталей в сучасному суднобудуванні і судноремонті [8, 9]. Зварювання плавленням виконується майже на кожній ділянці суднобудівної верфі [7]. При зварюванні плавленням метал зварного шва формується з розплавленого основного металу, до якого додається присадний матеріал. Властивості зварного з'єднання залежать від властивостей хімічних елементів, кількісного змісту основного і припадоного матеріалів, від навколишнього середовища, конструкції елементів, режимів зварювання та ін. факторів. Контакт розплавленого металу з повітрям призводить до окислення металу і розчинення в ньому азоту і водню. Тому при зварюванні плавленням використовують захист-шлакову, газову і комбіновану. Шлаковий захист може бути активним і пасивним. Функція активного захисту-розкислення, зв'язування фосфору і сірки, додаткове легування і т. п. При газовому захисті (в середовищі інертних газів) розкислювачі і легуючі елементи вводяться через зварювальний дріт. Формування з'єднання відбувається шляхом термодинамічного перетворення речовини. Монолітність і міцність зварного з'єднання досягаються атомно-молекулярними зв'язками між елементарними частинками з'єднуються матеріалів.

На суднобудівних верфях використовується електродугове зварювання з флюсозахистом [10, 11], що називається зварюванням під флюсом. Електрод служить в якості наповнювач. Дуга, занурена в поверхневий шар флюсу, розплавляє його для створення захисного ізолюваного розплавленого екрану в зоні зварювального з'єднання. Після виконання зварювання, розплавлений метал захищається за рахунок шару розплавленого флюсу, який згодом

видаляється і може регенерувати. Зварювання під флюсом ідеально підходить для торцевого зварювання листів на лініях складання секцій, на ділянках зварювання листів і в монтажних зонах. Процес зварювання під флюсом є автоматичним.

Дугове газове зварювання вольфрамовим електродом застосовується на суднобудівних верфях для зварювання алюмінію, сталевих листів, а так ж труб і трубопроводів малого діаметра [12, 13]. Дуга виробляється між оброблюваним виробом і вольфрамовим електродом, який є неплавким електрод. Дуга не передає присадний матеріал, а просто розплавляє матеріал і електродний дріт, що призводить до більш чистого зварювання.

За допомогою зварювання і наплавлення відновлюються деталі шляхом нанесення на їх робочі поверхні покриттів, які протидіють корозійному та іншим видам зносу і руйнування. При цьому використовуються способи електродугового, газового, плазмового, індукційного наплавлення, а також газотермічного напилення, гальванічні та хіміко-термічні методи.

Фарбування виконується майже на кожній ділянці суднобудівної верфі [14]. Природа суднобудування і ремонту вимагає кілька типів фарбування. Типи фарбування класифікуються від покриттів на водній основі до високоякісних епоксидних покриттів. Тип фарбування залежить від навколишнього середовища, в якому буде працювати покриття. Обладнання для нанесення фарби варіюється від простих кистей і валиків до безповітряних розпилювачів і автоматичних механізмів. Суднове фарбування [14, 15] передбачається на наступних ділянках: підводна частина (нижня частина корпусу); ватерлінія; надбудови у верхній частині; внутрішні площі та резервуари; верхні палуби; обладнання для підйому якоря. Більшість суднобудівних заводів мають спеціальні виробничі приміщення і ділянки, де відбувається фарбування. Криті виробничі приміщення є дорогими, але забезпечують високу якість і ефективність фарбування. Фарбування на відкритому повітрі має нижчу ефективність і обмежується хорошими погодними умовами. Фарбування використовується для виконання ряду цілей

на різних ділянках судів. Одна фарба не може виконати всі необхідні функції: запобігання іржі, біологічного обростання і лужного формування. Фарби складаються з трьох інгредієнтів: пігменту, сполучного матеріалу і розчинника. Пігмент (оксид цинку, тальк, вуглець, кам'яновугільний дьоготь, свинець, слюда, алюміній і цинковий пил) визначає колір і властивості, пов'язані з покриттям. Сполучний матеріал (епоксидна смола, алкідна смола, уретан, вініл, фенол) утримує пігменти фарби між собою. Сполучна речовина визначає характеристики покриття (гнучкість, хімічний опір, стійкість, шорсткість). Розчинник (ацетон, білий спирт, ксилол, метилетилкетон та вода) додається для розрідження фарби. Частина розчинника фарби випаровується в міру висихання фарби. Фарби із захистом від біологічного обростання використовуються для запобігання росту і скупчення морських мікроорганізмів на корпусі судна [14]. Фарби на мідній основі широко використовуються для захисту від біологічного обростання. Для отримання різних відтінків, в фарбу додається лампова сажа, червоний оксид заліза або діоксид титану.

При виборі способу нанесення захисних покриттів необхідно враховувати основні умови їх формування [16]:

- термічні впливи на деталь повинні повністю запобігати фазовим або структурним перетворенням в основному металі;
- частка участі основного металу в покритті повинна бути близька до нуля;
- у зоні з'єднання не повинні розвиватися процеси релаксаційного характеру, які здатні змінити його структуру і фазовий склад.

З широкого спектру сучасних методів нанесення захисних покриттів різного функціонального призначення цій умові формування покриттів найбільш повно відповідають електроконтактні методи (наплавлення, припікання) [17]. Процес електроконтактного припікання покриттів (ЕКПП) характеризується використанням електричного струму силою 1,5...32 кА, вторинною напругою 1...6 В, тиском до 100 МПа і відрізняється високою швидкістю нагріву [18, 19]. Однак температура нагрівання порошку

знаходиться в межах $0,9...0,95 T_{пл}$. При ЕКПП нанесення покриттів здійснюється в твердій фазі. Головним принципом електроконтактного припікання є збереження спадковості, тобто початкових властивостей матеріалу покриття. ЕКПП має незначний вплив на метал відновлюваних поверхонь, температура деталі не перевищує $60...80\text{ }^{\circ}\text{C}$, відсутнє термічне викривлення деталей. Покриття, які наносяться способом ЕКПП, характеризуються малою зоною термічного впливу. Отримання покриттів без розплавлення присадочного матеріалу дозволяє наносити шари з необхідними фізико-механічними властивостями. Технологія ЕКПП відноситься до категорії "холодних" і "сухих", не вимагає рідких технологічних середовищ. Покриття характеризуються міцністю зчеплення $150 \dots 350\text{ МПа}$, пористістю до 10%, низькою енергоємністю процесу, високою продуктивністю, відсутністю випромінювання і газовиділення, мінімальними припусками на фінішну обробку [18]. Однак, широке застосування методу ЕКПП в ремонтному виробництві обмежується нерівномірністю нагріву відновлюваної поверхні і наноситься матеріалу покриття по перерізу, що призводить до погіршення експлуатаційних властивостей відновлених деталей. Основний недолік технології ЕКПП-крайовий ефект, який призводить до нерівномірного розподілу температури і тиску по ширині електрода. Наслідком цього є неоднорідна пористість покриття, максимальна в зонах кромки електрода, а також нерівномірність адгезійної міцності зі зниженням її в зоні кромки [19].

В умовах економічної ситуації в Україні зростає необхідність в забезпеченні судноремонтних і суднобудівних підприємств недорогими технологіями нанесення захисних покриттів, такими як електродугове напилення (ЕДН) [20]. У світовій практиці антикорозійного захисту електродуговий метод напилення отримав значне поширення. Обладнання, на якому проводять напилення, є порівняно простим, легким і його можна досить швидко переміщати. Доцільність застосування ЕДН забезпечується його такими перевагами [21]: доступністю джерела енергії; технологічність та гнучкість застосування до різних за типорозмірами деталей; висока

продуктивність нанесення покриття (до 20 кг/год сталі); отримання покриттів товщиною від 0,1 до 10 і більше міліметрів; відсутністю значного термічного впливу на деталь (температура нагріву деталі); відсутність деформації деталей; простота і технологічність процесу; можливість нанесення покриття на поверхні деталей з різних матеріалів (сталь, чавун, і ін.); отриманням покриттів з різних матеріалів дроту з заданими властивостями.

Заводська собівартість термічного напилення висока у порівнянні з фарбуванням, хоча якщо брати до уваги термін служби, термічне напилення більш економічний процес. Багато суднобудівних верфів мають власні механізми термічного напилення, а інші заводи укладають субпідряд на проведення термічного покриття. Термічне напилення може виконуватися в цеху або на борту судна.

Таким чином, результати проведеного аналізу науково-технічної літератури показали, що розробка ефективних ресурсозберігаючих технологій з використанням сучасних методів зміцнення і відновлення, організація спеціалізованих ділянок ремонту на підприємствах водного транспорту являє собою серйозне та актуальне завдання. Перспективним і ефективним вирішенням проблеми нанесення антикорозійних покриттів є використання різноманітних видів газотермічного напилення.

1.2. Проблеми кавітаційного зношування судових деталей

Явища кавітації, що виникають на корпусі судна, зокрема в районі рульового пристрою, знижують ефективність та безпеку швидкохідних морських суден. Кавітація визначається як багаторазове зародження, ріст і різке руйнування порожнин або бульбашок у рідині. Кавітаційна ерозія – це механічне руйнування матеріалів, спричинене кавітацією у рідкому середовищі. Існують дві основні гіпотези щодо механізму пошкодження твердих поверхонь внаслідок кавітаційної ерозії. Перша ґрунтується на утворенні ударних хвиль під час імпульсу бульбашок, тиск яких оцінюється приблизно в 7×10^9 Па (рис.1.1).

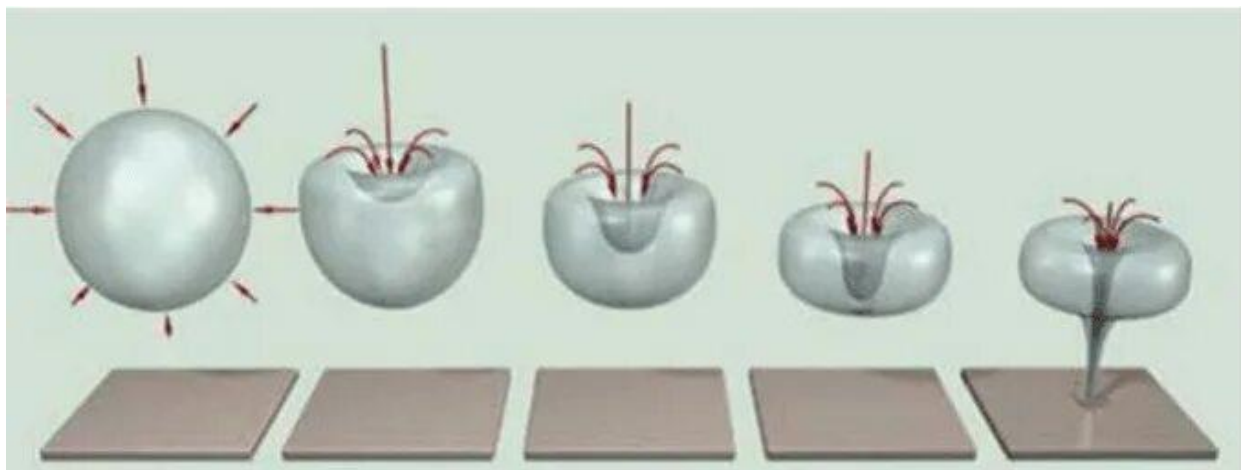


Рисунок 1.1 – Виникнення ударної хвилі при кавітації

Друга гіпотеза передбачає виникнення мікроструменів під час колапсу бульбашки в асиметричному полі тисків. В обох випадках механічні навантаження мають локальний характер, але можуть бути надзвичайно інтенсивними, що призводить до деформації поверхні. Повторне навантаження зрештою спричиняє втрату матеріалу з поверхні, тобто ерозію [22].

Основні елементи корпусу судна, які страждають від кавітації:

1. Гребні гвинти та їх компоненти. Найбільш уразливі лопаті гвинта через високі швидкості обертання. Кавітація виникає на тильній поверхні лопатей (зона низького тиску) та їхніх кромках. Корпус гвинта (ступиця) – зона з'єднання лопатей зі ступицею, де утворюються вихори.

2. Рульові пристрої, а саме передні кромки руля через турбулентність від гвинта призводить до кавітації на поверхні руля, особливо під час різких маневрів. Також уразливими є зони навколо рульового пера – відірвані потоки води створюють місця зниженого тиску.

3. Корпус у районі корми (місце виходу гребного вала): зазори та нерівності сприяють утворенню кавітаційних бульбашок.

4. Підводні крила та інші гідродинамічні елементи: передні кромки та зони зі змінним профілем, де швидкість потоку різко зростає. Транець (кормова частина) створює від'ємний тиск при русі судна на хвилях може провокувати кавітацію.

5. Системи забору води: локальне збільшення швидкості води в трубах або клапанах призводить до кавітації. Також решітки та фільтри, що створюють перешкоди в потоці та збільшують кількість зон низького тиску.

Рульовий пристрій вважається одним із ключових компонентів судна для навігації та безпеки, який працює в складних умовах кавітаційної ерозії та морської корозії. Оскільки нещодавні досягнення у суднобудуванні сприяють підвищенню крейсерської швидкості, кавітаційна ерозія рулевих пристроїв значно посилюється, що скорочує їхній термін служби до менш ніж 1 року, як показано на рис. 1.2.

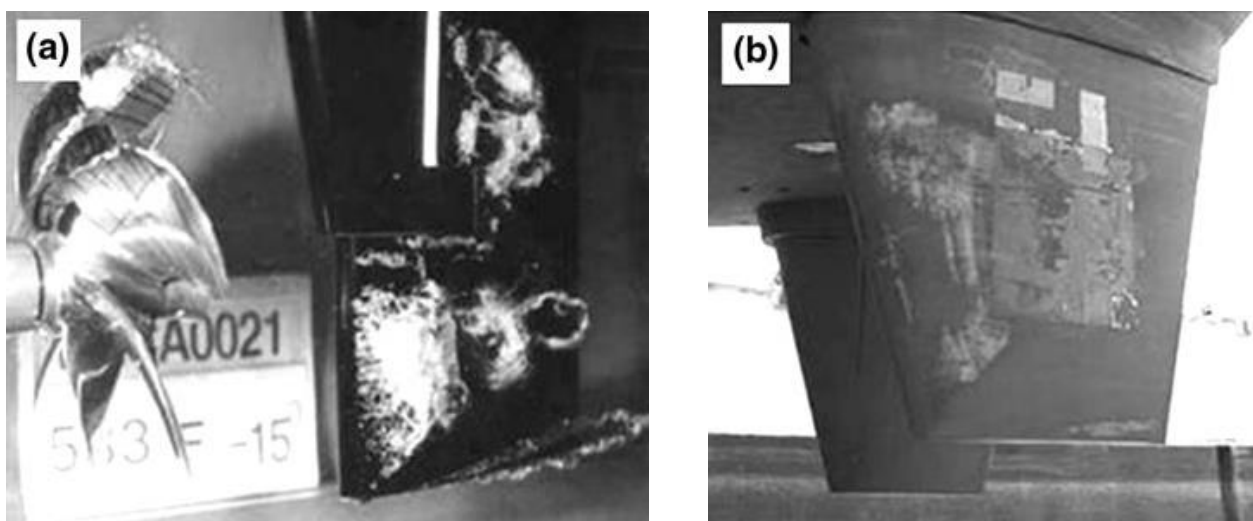


Рисунок 1.2 - Кавітаційна ерозія та (а) кавітаційні пошкодження (б) рульового пристрою судна

Динамічні коливання тиску, спричинені рухами руля під час зміни курсу або при хвилюванні з корми, неможливо повністю усунути навіть шляхом оптимізації гідродинамічних характеристик [23]. Локальні коливання тиску є достатньо значними для ініціювання кавітації, тобто утворення та імплзії парових бульбашок. У довгостроковій перспективі циклічне навантаження призводить до втоми матеріалу та локальної ерозії поверхні [24].

На практиці судна ставлять у док кожні 5–7 років для ремонту пошкоджень у зоні рульового пристрою шляхом наплавлення та шліфувальних робіт. Як перспективна альтернатива, активно досліджується застосування термічних та кінетичних методів напилення для створення покриттів, стійких до ерозії, спричиненої кавітацією. У літературі описано окремі процедури

оптимізації для різних методів напилення [25, 26]. Однак, на сьогоднішній день відсутній комплексний порівняльний аналіз оптимізованих покриттів, отриманих різними методами. У якості орієнтира для вибору процесу в даному дослідженні описано процедури та індивідуально оптимізовані властивості покриттів з алюмінієвої бронзи, отриманих шляхом застосування різних методів напилення.

Відповідні дані оцінюються у порівнянні з характеристиками масивних матеріалів, таких як суднобудівна сталь та високостійка до кавітаційної ерозії нікель-алюмінієва бронза, що використовується для гребних гвинтів. Для полегшення аналізу в цьому дослідженні розглядаються покриття на плоских поверхнях із типовою товщиною шару в діапазоні 300–600 мікрон.

У порівнянні з наплавленням, термічне або холодне напилення має перевагу у вигляді відсутності розплавлення поверхні деталі, що виключає небажане змішування основного матеріалу з напилюваним. Це дозволяє уникнути утворення крихких фаз, які виникають при змішуванні рідких фаз і подальшій кристалізації [27]. Серед цих технологій холодне напилення має перевагу над термічним, оскільки дозволяє уникнути окиснення матеріалу завдяки його ударному осадженню у твердому стані [28].

1.3. Застосування газотермічних методів напилення для вирішення проблем зносу суднових деталей

Термічні методи напилення, такі як дугове та плазмове напилення, а також напилення полум'ям і високошвидкісне киснево-паливне (HVOF) напилення, протягом десятиліть застосовуються в різних галузях – від автомобільної та авіаційної промисловості до машинобудування – для нанесення зносо- та корозійностійких покриттів [29, 30]. Окрему увагу в дослідженні приділено холодному напиленню через його потенційну здатність формувати покриття з властивостями, подібними до масивного матеріалу, навіть при використанні високоміцних алюмінієвих бронз [29].

Однак для обох технологій необхідно мінімізувати дефекти в покриттях – наприклад, оксидні включення у термічному напиленні або слабо зв'язані

внутрішні межі у холодному напиленні – щоб забезпечити достатньо високі механічні властивості та, відповідно, стійкість до кавітаційної ерозії. Тому в подальшому буде представлено короткий огляд технологій напилення, використаних у експериментальних випробуваннях, а також індивідуальних заходів щодо оптимізації покриттів.

У холодному напиленні частинки прискорюються в струмені інертного газу високого тиску, проходячи через конфузорно-дифузорну сопло (Де-Лавалля), і досягають надзвукової швидкості перед ударом об поверхню деталі [31].

На рис.1.3 представлена схема, що ілюструє принцип цього методу нанесення покриттів. Для досягнення вищих швидкостей газу при проходженні через найменший переріз сопла, а відповідно й вищих швидкостей частинок, робочий газ зазвичай попередньо нагрівають до кількох сотень або максимум до приблизно тисячі градусів Цельсія, що сприяє пластичній деформації частинок під час удару.

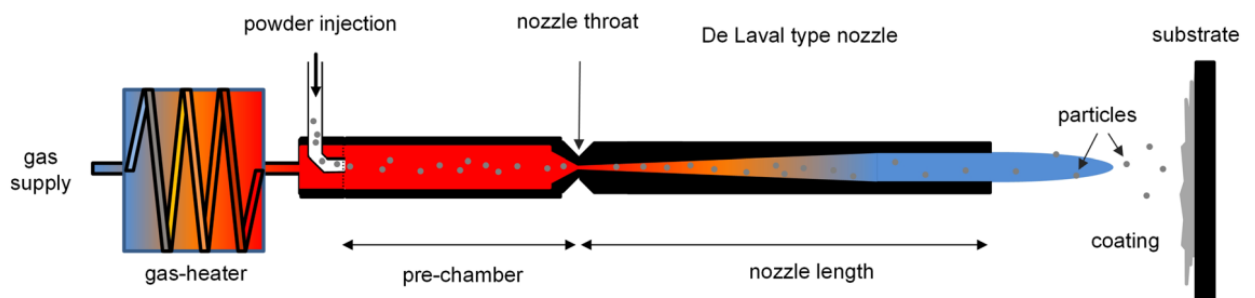


Рисунок 1.3 – Схема газодинамічного холодного напилення [31]

Вирішальним фактором для адгезії є локальне пом'якшення матеріалу на межі контакту внаслідок швидкої та інтенсивної пластичної деформації, при якому цей ефект домінує над усіма механізмами зміцнення, що призводить до утворення адіабатичних зсувних нестабільностей (ASI) [32]. Для успішного формування покриття швидкість удару частинок має перевищувати відповідну критичну швидкість, яка залежить від матеріалу й температури. Якість покриття визначається відношенням цих швидкостей [32]. Однак потенційним недоліком процесу є його менша розповсюдженість у порівнянні з іншими технологіями напилення.

Високошвидкісне киснево-паливне (HVOF) напилення. HVOF-характеризується тим, що розплавлені частинки лише короткочасно контактують із навколишнім середовищем, тому окиснення мінімальне, та висока швидкість удару забезпечує щільну структуру покриття [33]. Цей метод є добре освоєною технологією з можливістю отримання якісних покриттів. Проте вплив оксидних включень на механічні властивості має бути мінімізований.

При HVOF-напиленні з використанням газового палива співвідношення кисню й пального можна регулювати в субстехіометричному діапазоні [34]. Це знижує температуру полум'я, зменшуючи вміст вільного кисню у факелі та струмені, що мінімізує окиснення матеріалу [34]. Додаткове зменшення окиснення досягається використанням систем із газовим охолодженням стінок камери згоряння та введенням порошку безпосередньо в камеру. Використання азоту як захисного газу також допомагає уникнути контакту частинок із киснем [35]. Рис. 1.4 ілюструє принцип роботи системи HVOF-напилення *Diamond Jet 2700 Hybrid* від Oerlikon Metco.

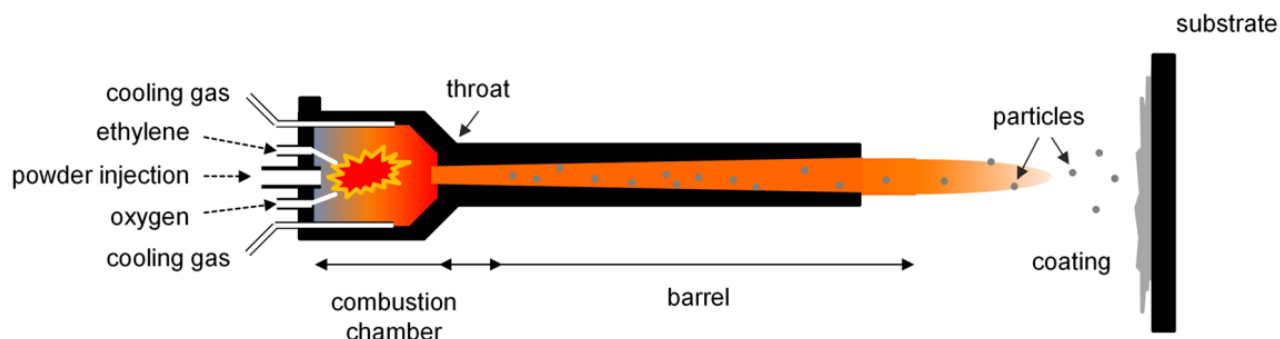


Рисунок 1.4 – Схема високошвидкісного киснево-паливного (HVOF) напилення [35]

Дугова технологія напилення. У межах цього порівняння дугове напилення є простою та економічно вигідною технологією термічного напилення [36]. Метод базується на плавленні дровогого присадкового матеріалу електричною дугою між двома електродами. Через обмежене прискорення розплавлених частинок ця технологія належить до низькошвидкісного діапазону методів, досліджених у цій роботі. Однак її

перевагами є висока продуктивність і проста інфраструктура, що робить її доступною для суднобудівних верфей, оскільки вона аналогічна процесам дугового зварювання.

Для атомізації розплавленого металу та його транспортування на підготовлену поверхню деталі зазвичай використовують один або кілька струменів газу, найчастіше стисненого повітря. Дугове напилення характеризується добре відомими ключовими факторами і широко застосовується для антикорозійного захисту великих конструкцій та проведення ремонтних робіт безпосередньо на об'єкті [37]. У зв'язку з цим цей метод розглядається і для відновлення ерозійно зношених рульових пристроїв суден, а також для контурного напилення гребних гвинтів [38, 39].

Якість кінцевого покриття в основному залежить від таких параметрів, як напруга та сила струму дуги, швидкість та тиск газу, а також тип використовуваного газу [40].

Останні розробки у сфері дугового напилення включають концепції відкритих пальників із вільним спрямованим потоком газу до кінчиків дроту, що забезпечує меншу розбіжність частинок у струмені та вищу швидкість їхнього руху — до 360 м/с [41]. Рис. 1.5 демонструє порівняння цієї технології з традиційними системами напилення.

Крім того, тип розпилюючих газів може значно поліпшити якість покриттів, одержуваних дуговим напиленням [39]. Як альтернатива стисненому повітрю, азот або суміші азоту та водню можуть забезпечити хімічно активну атмосферу. Зокрема, добавки відновлюючого водню можуть значно знизити вміст кисню у покриттях.

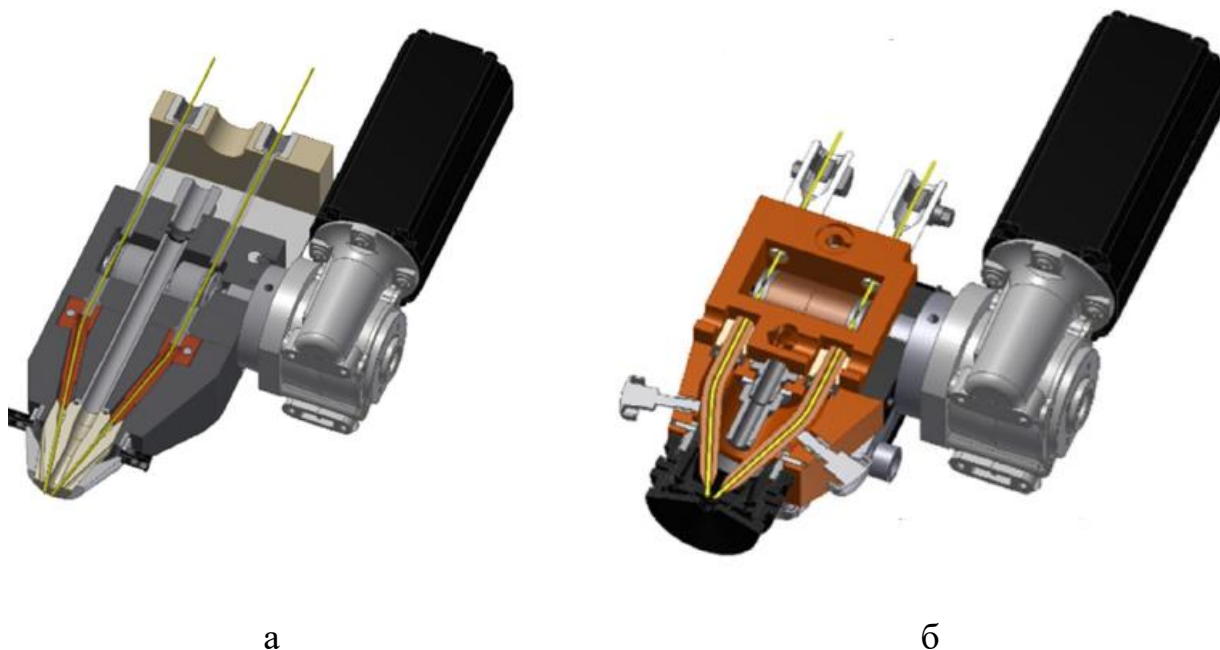


Рисунок 1.5 – Порівняльний аналіз конструкторських електродугових розпилювачів:
а – традиційний; б – модернізований [41]

В якості другого методу *solidstate* напилення, крім холодного, в рамках технологічного порівняння оцінювалося також тепле (*warm*) напилення. Цей процес розглядався як перспективна альтернатива для подолання обмежень холодного напилення щодо використання твердих порошків і необхідного підвищення доступних температурних режимів процесу. Технологія теплового напилення, розроблена в Національному інституті матеріалознавства (NIMS) в Цукубі, Японія, заснована на технології HVOF з додаванням газового охолодження в кінці камери згоряння. Принцип полягає в схематично показано на малюнку. 1.6.

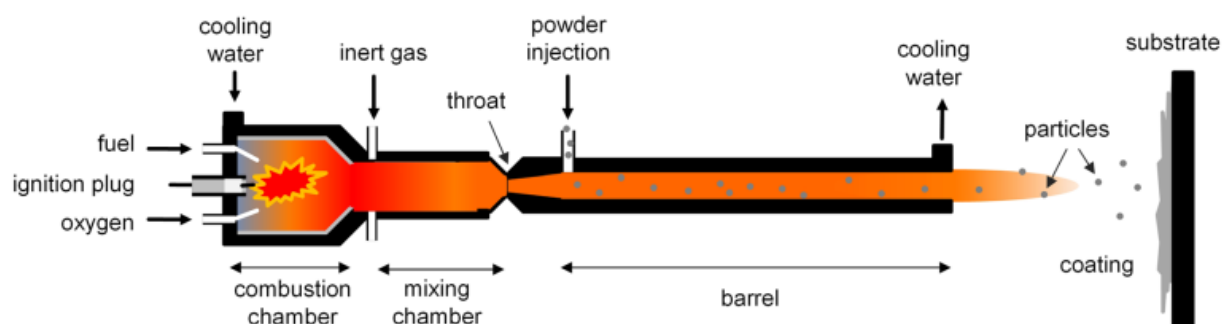


Рисунок 1.6 – Схема теплового напилення (*warm spraying*)

Як і при HVOF-напиленні, при подачі рідкого палива кисень і гас змішуються, а потім запалюються і згоряють в камері згоряння [42]. Спочатку в

результаті згоряння температура газу досягає 2700 °С. Залежно від тиску кисню і умов горіння у стандартних умовах може бути встановлено тиск технологічного газу, як правило, до 1 МПа . В умовах високого тиску може бути досягнуто тиск технологічного газу до 4 МПа [43]. В змішувальну камеру , розташовану після камери згоряння, подається азот, що використовується в технологічному процесі в якості охолоджуючої рідини. Залежно від швидкості потоку N₂, яка зазвичай становить від 500 до 1000 л / хв, можна досягти більш низьких температур технологічного газу. Після камери змішування газ проходить через сектори сопла Лавалю. Порошкоподібна сировина подається в газовий потік за горловиною сопла, прискорюється і нагрівається відповідно до місцевих газових умов. У порівнянні з холодним напиленням, тепле напилення забезпечує такі ж швидкості частинок, але більш високу температуру частинок. Розпилений матеріал зазвичай залишається в твердому стані, що зводить до мінімуму окислення і забезпечує достатній рівень нагрівання частинок.

Таким чином, відповідно до проведеного аналізу можна побудувати порівняльну таблицю проаналізованих методів газотермічного напилення (табл. 1.1.).

Таблиця 1.1 – Рівень характеристик розглянутих методів ГТН

Критерій	Електродугове напилення (ЕДН)	HVOF	Cold Spray
Швидкість частинок	50–150 м/с	500–1200 м/с	500–1200 м/с
Температура процесу	Висока (до 4000°C)	Висока (до 3000°C)	Низька (<800°C)
Адгезія покриття	Середня (30–50 МПа)	Висока (60–80 МПа)	Висока (50–70 МПа)
Щільність покриття	85–92%	95–99%	95–99%
Товщина шару	До 5 мм	До 2 мм	До 5 мм
Основні	Нержавіючі сталі, Ni-	WC-Co, Cr3C2-	Мідь, алюміній, Ni-

Критерій	Електродугове напilenня (ЕДН)	HVOF	Cold Spray
матеріали	Cr-B-Si, Fe-сплави	NiCr, кераміка	сплави, композити
Вплив на основу	Помірний нагрів	Мінімальний нагрів	Відсутній нагрів
Продуктивність	Висока (до 20 кг/год)	Середня (5–10 кг/год)	Низька (2–5 кг/год)
Вартість	Низька	Висока	Дуже висока

Отже, електродугове напilenня є сучасним, економічно вигідним і технологічно ефективним методом захисту суднових конструкцій від кавітації. Воно дозволяє не лише підвищити довговічність деталей, а й зменшити витрати на ремонт та заміну вузлів, що робить його актуальним для сучасного суднобудування.

1.6. Висновки і постановка задач кваліфікаційної роботи бакалавра

На основі проведеного дослідження показано, що досить серйозною проблемою суднових деталей судна є кавітаційне зношування, що пов'язано з утворенням ударних хвиль та виникненням мікроструменів під час колапсу бульбашок в асиметричному полі тисків. В обох випадках механічні навантаження мають локальний характер, але можуть бути надзвичайно інтенсивними, що призводить до деформації поверхні та втрати матеріалу з неї. До основних елементів корпусу судна, які страждають від описаного виду зношування відносяться гребні гвинти та їх компоненти, рульові пристрої, корпус у районі корми, підводні крила та гідродинамічні елементи. Виходячи з проведеного аналізу науково-технічної літератури стосовно сучасного стану та шляхів розвитку нанесення захисних покриттів для деталей суднобудування та судноремонту встановлено, що найбільш економічно вигідним і технологічно ефективним методом для вирішення означеної проблеми є застосування електродугового напilenня. Тому метою роботи є дослідження та аналіз технології напilenня електродугових покриттів для захисту від кавітаційного

зношування деталей суднобудування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати технологію нанесення електродугових захисних та зміцнювальних покриттів та провести вибір матеріалів для напилення;
- отримати електродугові покриття з рекомендованих матеріалів;
- проаналізувати мікроструктуру сформованих покриттів;
- визначити механічні властивості покриттів, а саме твердість та міцність зчеплення з основою;
- визначити експлуатаційні властивості покриттів такі як зносостійкість та корозійна стійкість. Проаналізувати мікроструктуру зразків після випробувань на корозійну стійкість;
- надати рекомендації щодо вибору напилюваних матеріалів відповідно до рівня навантаження суднових деталей.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА НАПИЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ.

АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ СФОРМОВАНИХ ПОКРИТТІВ

2.1. Вибір установки для електродугового напилення

Установки для електродугового напилення покриттів комплектуються розпилювачами ручного, стаціонарного або змішаного типу джерелом живлення дуги системою подачі стиснутого газу (переважно повітря) і пультом керування.

Систематичний випуск апаратури для електродугового напилювання у колишньому СРСР розпочався ще в 1949 р., останніми роками випускається комплектне обладнання. До складу комплекту входить не тільки електродуговий розпилювач (один або декілька), а також джерело живлення до нього, касети для дроту і пульт керування.

На практиці широко застосовують комплект для електродугової металізації КДМ-2, створений на базі моделі комплекту КДМ-1. До складу КДМ-2 входять: електродуговий розпилювач ЕМ-14 джерело живлення ТИМЕЗ-500 переносна стійка з котушкою для дроту пульт керування повітряний фільтр і засоби індивідуального захисту.

Технічні характеристики КДМ-2:

Потужність, кВт.....	менше 25
Робочий струм, А.....	менше 400
Робоча напруга, В.....	17...44
Робочий тиск стисненого повітря, мПа.....	0,5...0,6
Витрата стисненого повітря, м ³ /год.....	90
Діаметр розпилюваного дроту, мм.....	1,5...2,0
Швидкість подачі дроту, м/хв.....	2...14
Продуктивність, кг/год	
за алюмінієм.....	12,5
за сталлю.....	10,0
Коефіцієнт використання матеріалу.....	0,70...0,75
Маса комплекту, кг.....	470

Принцип роботи електродугового розпилювача полягає в тому, що через два канали безперервно подають два дроти (діаметром 1,5...3,2 мм), між кінцями яких збуджується дуга, яка розплавляє дроти. Розплавлений метал підхvacується струменем стиснутого повітря, яке витікає із центрального сопла

електродугового розпилювача, і в дрібнорозплавленому вигляді переноситься на поверхню основного матеріалу. Розпилювання і транспортування розплавленого металу здійснюються стиснутим повітрям для напилювання корозійностійкою сталлю і алюмінієвими сплавами використовують азот. Для електродугового напилення застосовують джерела живлення постійного струму. Електродуговий розпилювач ЕМ-14 призначено для напилення покриттів з багатьох дротових матеріалів і розраховано для проведення переважно ручних робіт. Для електродугового напилення покриттів у стаціонарних умовах випускають розпилювачі ЕМ-12, ЕМ-15.

Таким чином, виходячи з того, що установка КДМ-2 є однією з найпоширеніших в Україні та СНД також вона характеризується достатньою мобільністю, ремонтпридатністю та адаптацією до судових умов, обрано саме це обладнання. До її комплекту входить металізатор ЕМ-14.

2.2. Вибір напилюваних матеріалів

2.2.1. Сплави на основі алюмінію

Кавітаційне зношування виникає через динамічне руйнування поверхні матеріалу під дією ударних хвиль, що утворюються при колапсі газових бульбашок у рідині. Алюмінієві сплави з кремнієм (Al-Si) є перспективними для боротьби з цим явищем завдяки низці ключових властивостей. Кремній (Si) утворює тверді кристалічні фази (наприклад, евтектичний Si у сплавах Al-Si12), які: підвищують твердість і зносостійкість поверхні; сприяють розподілу ударних навантажень, запобігаючи глибокому проникненню тріщин. При вмісті Si 12–18% (наприклад, AlSi12, AlSi18) сплави набувають властивостей, близьких до чавунів, але зі значно меншою густиною. Модифіковані сплави (з добавками Na, Sr або P) мають дрібнозернисту структуру, що:

- зменшує ймовірність утворення тріщин;
- підвищує ударну в'язкість.

Також вказані сплави характеризуються винятковою корозійною стійкістю у морській воді. Алюміній пасивується у воді, утворюючи захисний шар оксиду алюмінію, який запобігає електрохімічній корозії та являється

стійким до хлоридів. Додавання кремнію посилює корозійну стійкість, оскільки від також утворює оксидні плівки. Густина сплавів (2,6-2,8 г/см³) значно нижча ніж у сталей, що зменшує загальну масу судна, підвищує паливну ефективність та спрощує нанесення покриттів. Висока теплопровідність сприяє швидкому розсіюванню енергії кавітаційних ударів та запобігає локальному перегрів. Таким чином, можна запропонувати вказані сплави для нанесення захисних покриттів на не критично навантажених зон деталей судна – рульового пристрою, корпусу у районі корми та складових забору води.

2.2. Сплави на основі міді

Для більш навантажених судових деталей, наприклад, відновлення та зміцнення гребних гвинтів доцільніше застосовувати бронзи, а саме, з вмістом нікелю та алюмінію (*NAB – nickel aluminium bronze*). Вказаний матеріал характеризується високою міцністю і в'язкістю, що дозволяє ефективно протистояти ударним навантаженням, спричиненими кавітаційними бульбашками. Нікель підвищує корозійну стійкість і зносостійкість матеріалу. Мідь у складі бронзи забезпечує стійкість до морської води, а нікель і алюміній підсилюють хімічну інертність, запобігаючи появі пітінгової корозії та електрохімічній корозії. Матеріал має оптимальну твердість (HRC 20–30), що дозволяє зберігати гладкість поверхні, зменшуючи ризик виникнення кавітації. Для порівняння, більш тверді покриття (наприклад, на основі карбідів) можуть спричиняти турбулентність. Нікелеву бронзу можна наносити без термічного пошкодження основного матеріалу (латуні або нержавійки), а також легко відновлювати локальні пошкодження. Таким чином, нікелева бронза оптимально поєднує корозійну стійкість, зносостійкість і технологічність, що робить її ідеальним вибором для захисту гребних гвинтів від кавітації.

На основі проведеного аналізу, в якості сировини для дугового напилення в даному дослідженні використовувалися промислові металеві дроти. Їх склади наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Використані напилювані матеріали

Марка дроту	Хімічний склад
ER4043	Al-основа; Si-4.5...5.5%
ER4047	Al-основа; Si-12%; Mg-0.08%; Cu-0.05...0.15%
БрАЖН 9-4-4	Cu-основа; Al-9%; Fe-4%; Ni-4%

Підготовку поверхні зразків здійснювали безпосередньо перед напиленням за допомогою установки струменево-абразивної обробки марки 026-7 "Ремдеталь". Як абразив використовували електрокорунд марки 7Б, шліфзерно номер 125. Контроль якості обробленої поверхні проводився візуально. Струменево-абразивну обробку поверхні проводили на наступному технологічному режимі:

- Тиск стисненого повітря, МПа 0,4 ... 0,6
- Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм 100 ... 150
- Діаметр сопла, мм 12
- Кут падіння струменя на оброблювану поверхню, град 60 ... 90
- Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм / хв. 50 ... 200

Обробка проводилася в кілька проходів.

Електродугові композиційні покриття наносили за допомогою установки КДМ-2, що укомплектована апаратом ЕМ-14М. Напилення здійснювали на сталеві пластини, виготовлені з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45 розміром 50×20×5 мм і циліндричні зразки, діаметром 15 мм, висотою 4 мм. Товщину покриттів визначали вимірами зразків до і після напилення штангенциркулем. Товщина напилених покриттів становила 1,5 ... 2,0 мм. Параметри режиму напилення обиралися, виходячи з попередніх досліджень та становили: сила струму - 120А, напруга на дузі - 30В, тиск стисненого повітря - 0,6 МПа, тиск транспортуючого газу – 0,02 МПа, дистанція напилення – 100 мм.

2.3. Дослідження мікроструктури отриманих покриттів

Дослідження мікроструктури покриттів проводили за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕММА 102-2. Отримані знімки наведено на рис. 2.1.

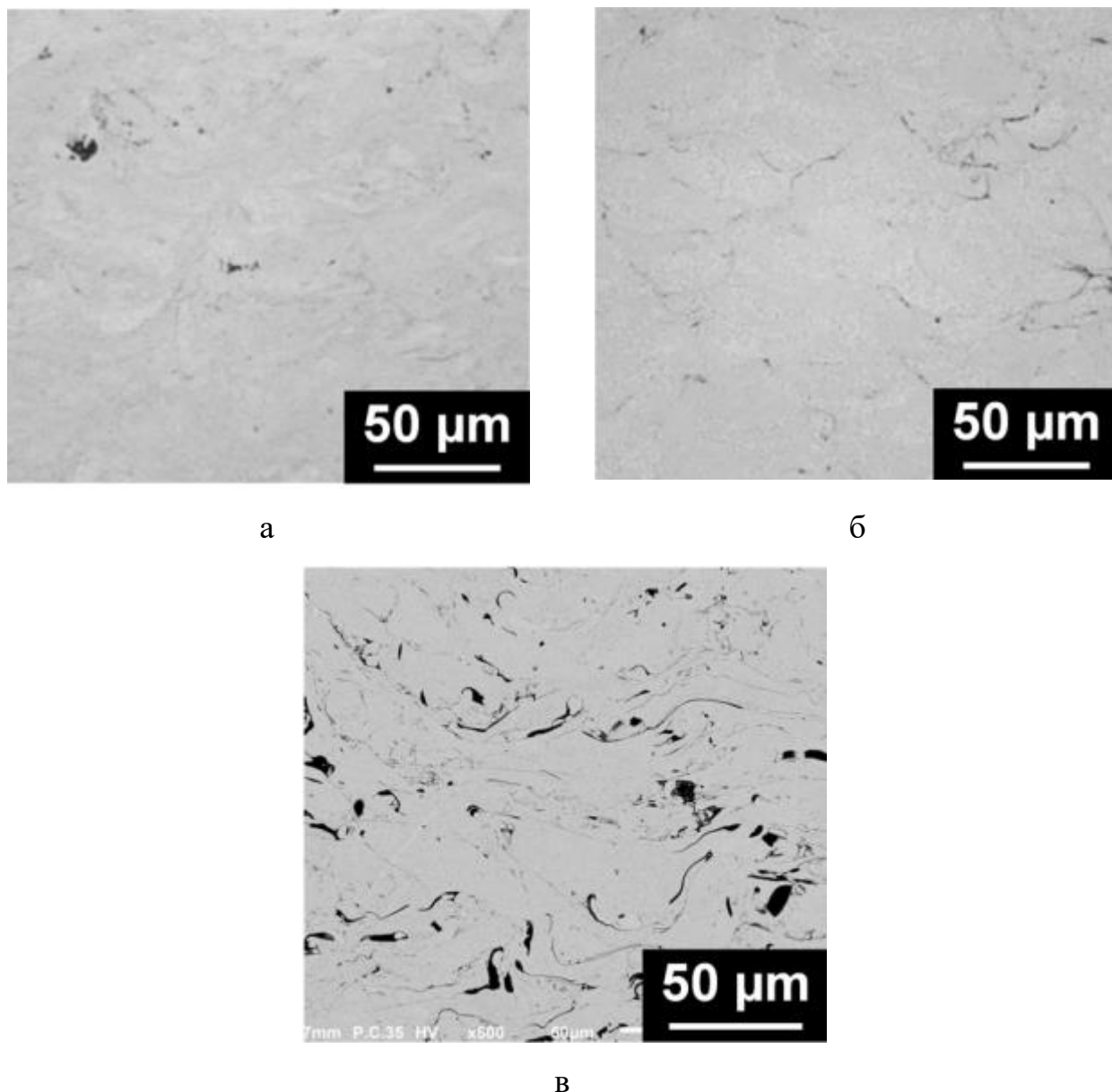


Рисунок 2.1 – Мікроструктура отриманих електродугових захисних покриттів з різних дротів: а - ER4043(Al5Si); б - ER4047(Al12Si); в - БрАЖН 9-4-4(NAВ)

Аналіз наведених мікроструктур показує наявність характерної для газотермічних покриттів лускатоподібної структури, що складається з деформованих у виді дисків напилюваних частинок. Між частинками знаходяться шари оксидів алюмінію (а, б) та міді (в). Покриття з дротів на основі алюмінію (а та б) мають дуже подібну мікроструктуру, що пояснюється

схожістю їх хімічного складу, та, як наслідок, подібних фізико-хімічних процесів при їх формуванні. У бронзового покриття добре ідентифікуються 3 фази: світла – бронза; чорна – пористість; сіра – оксидна плівка по границям zdeформованих частинок (ламелей).

Визначення пористості проводили планіметричним методом за отриманими мікроструктурами. Вибір даного методу пояснюється тим, що він у металографічній практиці достатньо ефективний при малому вмісті аналізованої фази (порядку декількох відсотків), та у таких випадках являється надійнішим за точковий та лінійний методи. Планіметричний метод ґрунтується на точному вираженні:

$$\sum V_{\alpha} = \sum F_{\alpha} = \sum h_{\alpha} = \sum z_{\alpha} / z \quad (2.1)$$

де $\sum V_{\alpha}$ – доля фази α у сплаві або сумарний об'єм усіх мікрочастинок цієї фази в одиниці об'єму мікроструктури, $\text{мм}^3/\text{мм}^3$; $\sum F_{\alpha}$ – середня сумарна величина площі, що зайнята фазою α на одиниці площі двовірної структури, $\text{мм}^2/\text{мм}^2$; $\sum h_{\alpha}$ – середня сумарна довжина відрізків, що проходять по фазі α , на одиницю довжини січної, $\text{мм}/\text{мм}$; $\sum z_{\alpha} / z$ – середнє сумарне відношення точок, що потрапляють на α фазу до загальної кількості точок.

Згідно цього рівняння об'ємна частка структурної складової дорівнює частці площі, займаної нею на шліфі. Тому планіметричний метод зводиться до заміру сумарної площі перетинів мікрочастинок даної структурної складової на певній площі металографічного шліфа. Результати визначення пористості зразків наведено на рис. 2.2.

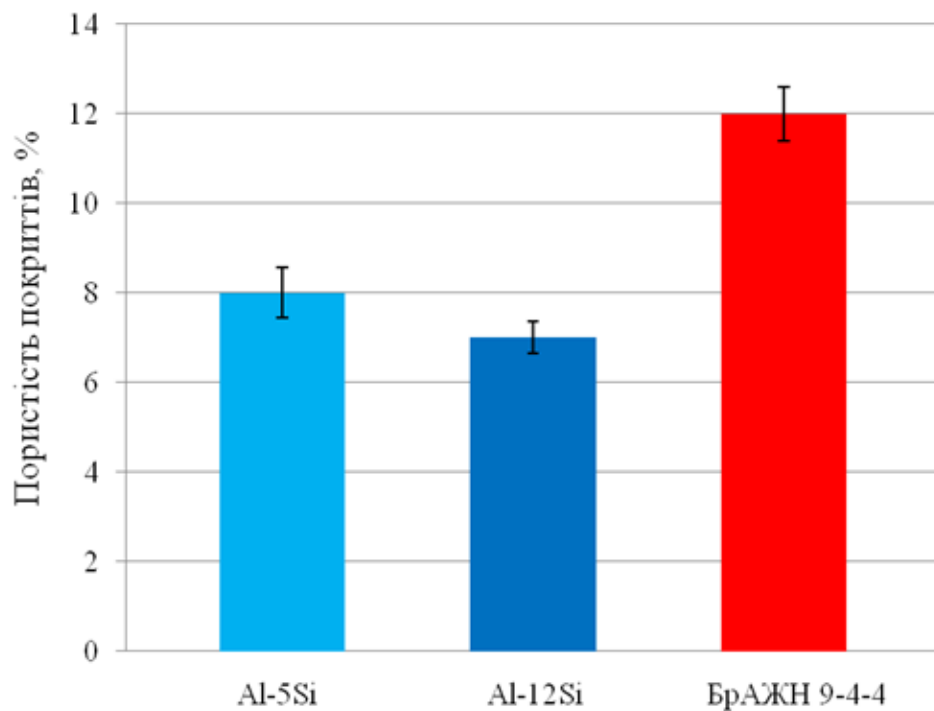


Рисунок 2.2 – Результати визначення пористості електродугових захисних покриттів з різних дротів

Наведені результати показують, що покриття на основі алюмінієвого дроту володіють меншою пористістю (7-8 %) у порівнянні з бронзовими покриттями (12%), що пояснюється більш активним окисненням міді та гіршим заповненням покриття напилкованими частинками.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СФОРМОВАНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

3.1 Мікротвердість покриттів

Мікротвердість зразків визначали на твердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 100 г. Результати визначення мікротвердості наведено на рис. 2.3.

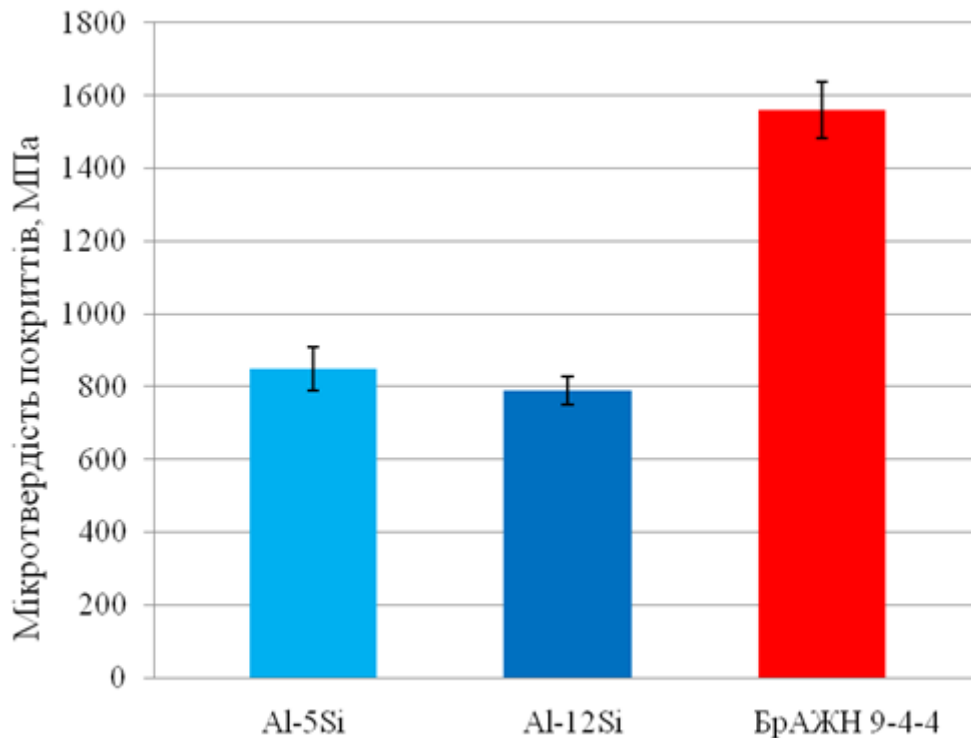


Рисунок 3.1 – Результати визначення мікротвердості електродугових захисних покриттів з різних дротів

Аналіз наведених результатів показує, що найнижча мікротвердість спостерігається для покриттів зі сплаву Al-12Si (790 МПа); для сплаву Al-5Si (850 МПа); бронзового покриття – 1560 МПа. Високий вміст кремнію (12%) утворює м'яку алюмінієво-кремнієву евтектику, яка знижує загальну твердість. Кремній у такій кількості не формує значних твердих частинок, а навпаки, сприяє пластичності. Менше кремнію (5%) означає менше м'якої евтектики, більше твердого алюмінієвого зерна. Однак у порівнянні з бронзою алюмінієві сплави все ще м'якші через відсутність важких легувальних елементів (Cu, Sn тощо). Твердість зростає через збільшення кількості твердих фаз (інтерметаліди, тверді розчини) та зменшення

пластичних компонентів (евтектика Al-Si). Al-Si покриття м'якші через велику частку пластичного кремнію, а бронза твердіша завдяки інтерметалічним сполукам.

3.2. Міцність зчеплення покриттів з основою

У літературі, присвяченій питанням дослідження когезійної і адгезійної міцності газотермічних покриттів, основна увага приділена останній. Це, очевидно, пов'язано з тим, що при експлуатації газотермічних покриттів, мають місце їх відшарування від матеріалу основи, і тому сформувалося переконання, що адгезійна міцність є лімітуючим параметром. Методи прямої кількісної оцінки забезпечують оцінку адгезійної міцності в фізичних одиницях, розуміючи під міцністю зчеплення роботу або зусилля, мінімально необхідні для повного видалення покриття з контактної поверхні.

Одним з основних способів визначення міцності зчеплення покриття з основним металом вважається штифтовий метод, який дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після нанесення покриття на зразки, тому його й використовували у даній роботі. Зразком служить бобишка, в отвір якої встановлюється штифт таким чином, що його торцева поверхня знаходиться врівень з площиною основи – бобишки (рис. 3.2). На загальну поверхню торця штифта і бобишки після відповідної підготовки наноситься покриття. Випробування проводять шляхом витягування конусного штифта з бобишки із записом зміни зусилля, після відриву штифта від покриття визначають відношення максимального навантаження до площі торця штифта. Це відношення є кількісною характеристикою з'єднання покриття з основою.

Для розтягування зразків використовували розривну машину УММ-5. Зразки для визначення міцності зчеплення виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45.

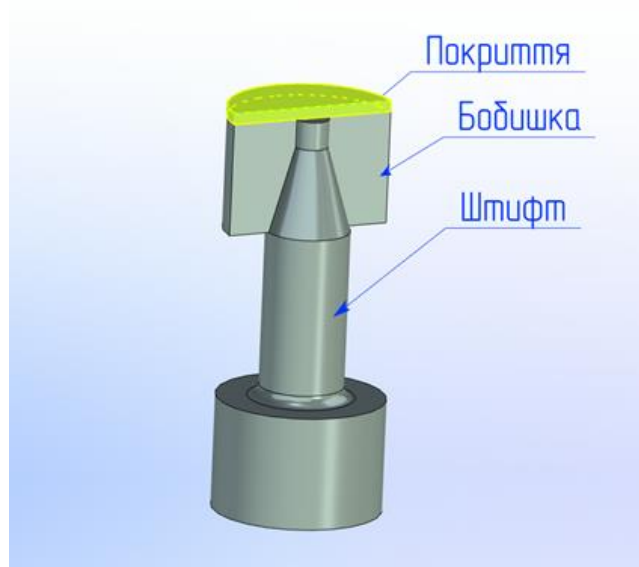


Рисунок 3.2 – Зразок для визначення міцності зчеплення покриттів з основою

Перед нанесенням покриттів поверхню, яка підлягала напilenню, обезжирювали технічним етанолом та піддавали струменево-абразивній обробці. Товщина нанесених покриттів складала 0,5...0,6 мм. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою напilenня на одному режимі виконували в один прохід на 3 зразки. Результати визначення міцності зчеплення напilenих та оброблених покриттів зі зазначених матеріалів наведено на рис. 3.3.

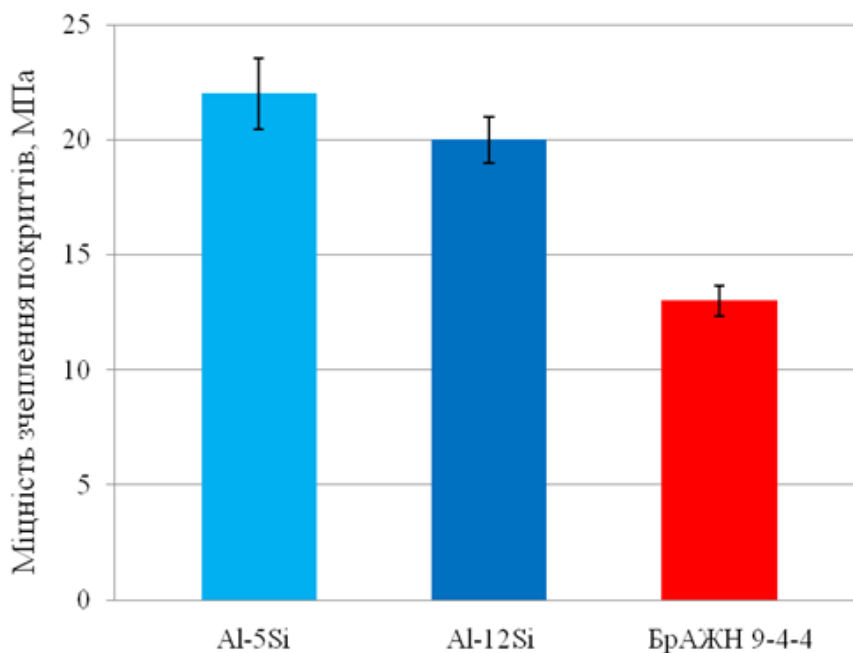


Рисунок 3.3 – Результати визначення міцності зчеплення покриттів з основою

Згідно з представленими даними, найвища міцність зчеплення покриттів з основою спостерігається для покриття з дроту Al-5Si (22МПа) при підвищенні кількості кремнію до 12% вказана характеристика дещо знижується до 20 МПа. Бронзові покриття характеризується міцністю зчеплення на рівні 13 МПа. Оптимальний вміст кремнію (5%) забезпечує гарну змочуваність основи (алюміній добре взаємодіє зі сталлю або іншою основою). Кремній покращує текучість розплаву, що сприяє кращому контакту з основою. Менше виділення кремнієвих фаз у порівнянні з Al-12Si означає менше внутрішніх напружень і кращу адгезію. Висока різниця в коефіцієнтах теплового розширення (КТР) між бронзою та сталеву (або алюмінієвою) основою призводить до великих залишкових напружень при охолодженні та відповідно призводить до менших значень міцності зчеплення.

3.3 Зносостійкість покриттів

Зносостійкість зразків покриттів була виміряна з використанням методу випробувань на абразивний знос відповідно з ASTM C6037. Втрата маси зразків періодично вимірювалася протягом річного циклу, і результати були перетворені в швидкість втрати товщини з використанням щільності покриття.

ASTM C6037 – це стандарт, який визначає методику оцінки зносостійкості (abrasion resistance) захисних покриттів, зокрема керамічних, металевих або композитних, за допомогою випробувань на абразивне зношування.

Основні положення ASTM C6037. Призначення методу:

- Визначення зносостійкості покриттів при тертя, абразії або ерозії.
- Використовується для порівняння різних матеріалів у промислових умовах (наприклад, для покриттів труб, валів, лопатей турбін).

Принцип випробування:

- Зразок піддається механічному впливу абразивного середовища (наприклад, карбід кремнію, корунд або сталеві кульки).
- Випробування може проводитися за допомогою:

- Taber Abraser (стандартний метод для тонких покриттів),
- Pin-on-Disk (для локального зношування),
- Dry Sand/Rubber Wheel Test (агресивне абразивне зношування).

Параметри оцінки:

- Масові втрати (г) або об'ємні втрати (мм³) після певної кількості циклів.
- Глибина зносу (мкм) – вимірюється профілометром.
- Коефіцієнт зносостійкості (порівняння з еталонним матеріалом).

Умови проведення тесту:

- Швидкість обертання абразивного колеса (наприклад, 60 об/хв).
- Навантаження (напр., 10 Н).
- Час тесту (напр., 1000 циклів).
- Тип абразиву (напр., SiC 220 grit).

Обробка результатів:

- Розрахунок швидкості зношування (напр., мм³/Н·м).
- Побудова графіків зносу залежно від часу/навантаження.

Результати визначення зносостійкості нанесених покриттів показано на рис. 3.4.

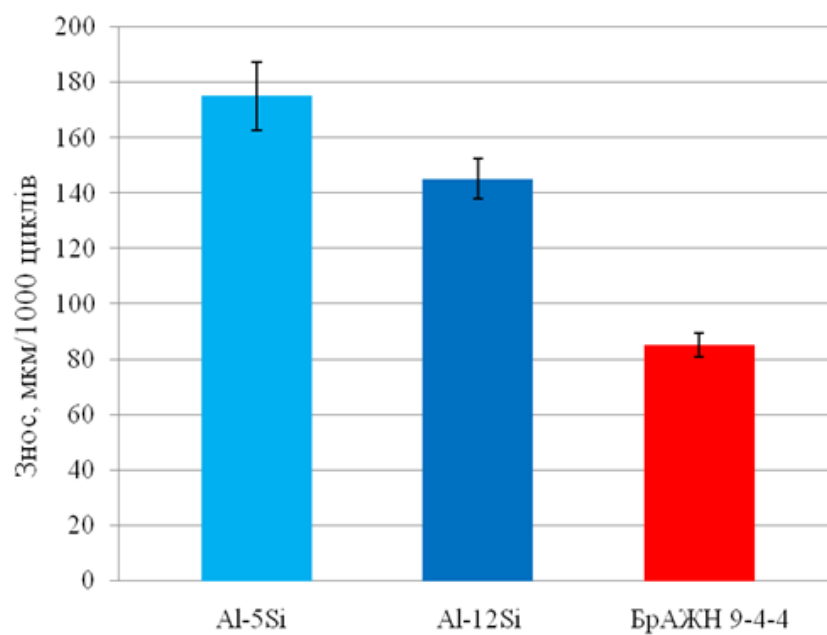
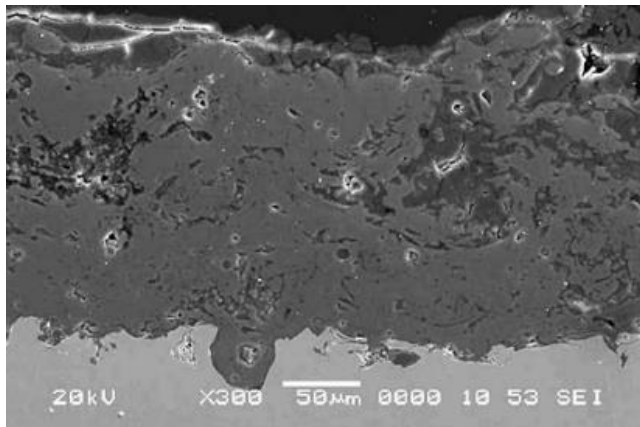


Рисунок 3.4 - Результати визначення зносостійкості електродугових покриттів

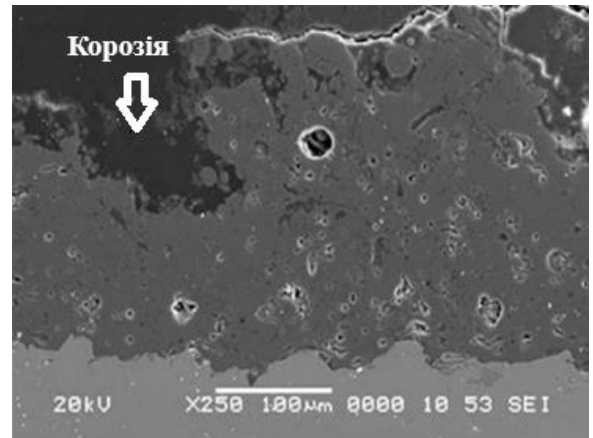
Згідно з наведеними результатами, зносостійкість бронзових покриттів майже у 2 рази вище ніж алюмінієвих, що пов'язано з виділенням інтерметалідів та більш високою твердістю. Таким чином, бронзові покриття можна рекомендувати для більш навантажених деталей, а саме, гребних гвинтів.

3.4 Корозійна стійкість покриттів

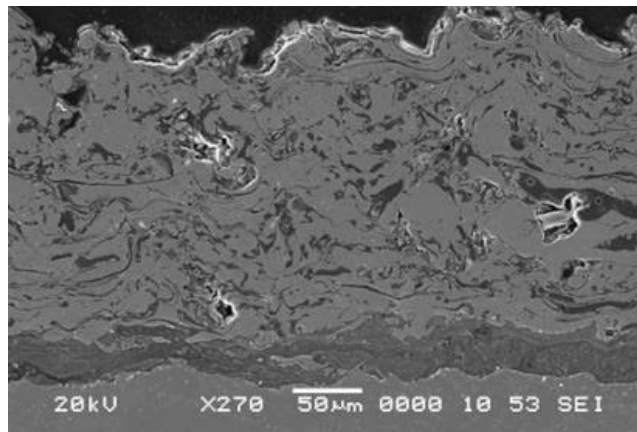
Для оцінки корозійних властивостей в морській атмосфері були проведені циклічні корозійні випробування (CCTS) відповідно до стандарту ISO 14993; корозія металів і сплавів-прискорені випробування, що включають циклічне вплив соляного туману, сухих і вологих умов. Кожен цикл складається з етапів зволоження (2 години), висихання (4 години) і розпилення солі (2 години). Хоча випробування повним зануренням у морську воду більш підходить для оцінки корозійної поведінки в морі, в даному дослідженні був використаний прискорений метод тестування, щоб прискорити процес відбору відповідного покриття матеріали з десяти різних. Корозійний властивості зразків покриттів були досліджені за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM). Мікроструктури зразків після випробувань наведено на рис. 3.5.



а



б



в

Рисунок 3.5 – Мікроструктура отриманих електродугових захисних покриттів з різних дротів: а - ER4043(Al-5Si); б - ER4047(Al1-2Si); в - БрАЖН 9-4-4(NAB)

У випадку Al-покриття не спостерігалось ніяких змін мікроструктури навіть після тривалого впливу агресивного середовища. Однак було виявлено, що додавання Si знижує корозійну стійкість покриттів з алюмінію, що призводить до утворення точкової корозії на поверхні і утворення продуктів корозії, таких як $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ і $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$. У проміжку між покриттям і підкладкою не було виявлено окислення через анодного ефекту Al-покриттів.

У бронзовому покритті також спостерігався поверхневий оксидний шар, але окислення відбувалося менш інтенсивно, в результаті чого після 100 циклів виходив відносно тонкий оксидний шар з меншою кількістю тріщин.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Встановлено, що одночасно з корозією деталей суднобудування досить важливим є питання захисту їх від кавітаційного зношування. Найбільш уразливими є лопаті гвинта через високі швидкості обертання, передні кромки рульового пристрою, корпус судна у районі корми та інші гідродинамічні елементи. Для їх захисту та відновлення пропонується застосування електродугового напилення покриттів зі сплавів на основі алюмінію та міді.

2. Після аналізу джерел інформації обрано ряд дротів для формування покриттів: ER4043(Al5Si); ER4047(Al12Si); БрАЖН 9-4-4(NAB). Отримано електродугові захисні покриття зі вказаних матеріалів. Досліджено мікроструктуру та пористість покритті. Показано, що покриття на основі алюмінієвого дроту володіють меншою пористістю (7-8 %) у порівнянні з бронзовими покриттями (12%), що пояснюється більш активним окисненням міді та гіршим заповненням покриття напилюваними частинками.

3. Досліджено мікротвердість, міцність зчеплення, зносостійкість та корозійну стійкість покриттів. Встановлено, що найнижча мікротвердість спостерігається для покриттів зі сплаву Al-12Si (790 МПа); для сплаву Al-5Si (850МПа); бронзового покриття – 1560МПа. Показано, що найвища міцність зчеплення покриттів з основою спостерігається для покриття з дроту Al-5Si (22МПа) при підвищенні кількості кремнію до 12% вказана характеристика дещо знижується до 20 МПа. Бронзові покриття характеризується міцністю зчеплення на рівні 13 МПа.

4. Експериментально встановлено, що зносостійкість бронзових покриттів майже у 2 рази вище ніж алюмінієвих, що пов'язано з виділенням інтерметалідів та більш високою твердістю. Корозійна стійкість покриттів є достатньою для застосування у морській воді. Для всіх покриттів у зоні між покриттям і підкладкою не виявлено продуктів корозії. Виявлено, що додавання Si знижує корозійну стійкість покриттів з алюмінію, що призводить до утворення точкової корозії на поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Global Fleet Renewal Trends 2024*. - London: Drewry Shipping Consultants, 2024. - 40 p. - URL: <https://www.drewry.co.uk> (дата звернення: 21.04.2025).
2. *Review of Maritime Transport 2023*. - Geneva: United Nations, 2023. - 180 p. - URL: <https://unctad.org/rmt> (дата звернення: 21.04.2025).
3. *World Fleet Monitor 2024*. - London: Clarksons Research Services, 2024. - URL: <https://www.clarksons.net> (дата звернення: 21.04.2025).
4. He Y., Chen Y., Zou X., Zhou D., Liu J., Yan D. (2024). A clearance control and interference repair method for ship rib plate assembly based on reverse engineering. *Ocean Engineering*, 309, 118402. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118402>
5. Liu Y., Frangopol D., Cheng M. (2019). Risk-informed structural repair decision making for service life extension of aging naval ships. *Marine Infrastructure*, 64, 305-321. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.10.008>
6. Anyfantis K. (2019). Preliminary design assessment of an alternative repair method for corroded shear panels in ship hull structures. *Ocean Engineering*, 188, 106323. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106323>
7. Zayed A., Garbatov Y., Soares C. (2013). Reliability of ship hulls subjected to corrosion and maintenance. *Structural Safety*, 43, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.01.001>
8. Chen Z., Liu Y., Qian H. (2023). Effect of repair welding on the fatigue behavior of AA6082-T6 T-joints in marine structures based on FFS and experiments. *Ocean Engineering*, 281, 114676. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114676>
9. Lotsberg I. (2025). Assessment of internal defects in flush ground butt welds in marine structures. *Marine Structures*, 99, 103696. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103696>
10. Han Y., Dong S., Zhang M. (2020). A novel underwater submerged-arc welding acquires sound quality joints for high strength marine steel. *Material Letters*, 261, 127075. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127075>

11. Wahidi S., Oterkus S., Oterkus E. (2024). Robotic welding techniques in marine structures and production processes: A systematic literature review. *Marine Structures*, 95, 103608. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103608>
12. Zhang M., Ma J., Luo X. (2025). Evaluation microstructure and corrosion behavior of different keyhole TIG welded joints of duplex stainless steel grade 2205 pipe. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 215, 105459. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105459>
13. Nishad S., Dwivedi D. (2024). Influence of filler metal and arc pulsation on P91 steel weldments developed by activated TIG welding and its effect on stress corrosion cracking. *Corrosion Science*, 239, 112415. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112415>
14. Celebi U., Vardar N. (2008). Investigation of VOC emissions from indoor and outdoor painting processes in shipyards. *Atmospheric Environment*, 42, 5685-5695. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.003>
15. Schubbe J., Bolstad S., Reyes S. (2016). Fatigue crack growth behavior of aerospace and ship-grade aluminum repaired with composite patches in a corrosive environment. *Composite Structures*, 144, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.107>
16. Peng J., Liu J., Xiao W. (2024). Comparative study on the corrosion behavior of two arc spraying coatings in simulated marine environments. *Surface and coating Technology*, 486, 130945. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130945>
17. Jebaraj V., Ajaykumar L., Deepak C. (2017). Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex Stainless Steel AISI2205 for marine applications – A recent review. *Journal of Advanced Research*, 8, 183-199. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.002>
18. Лопата Л. А. Поєднання процесів електроконтактного припікання порошків і теплового пластичного деформування / Л. А. Лопата, М. В. Красота // Системні метод керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. - Київ, НТУ, 2001. – Вип. 12. – С. 79-86.

19. Лопата Л. А. Достижения равномерного нагрева порошковых шаров при электроимпульсному припиканні металевих порошків / Л. А. Лопата, М. В. Красота / Таврической государственной агротехнической академии. – Мелитополь, 1999. – Вып. 2, Том 7. – С. 67-69.
20. Dimate Castellanos, L. M., Morales Torres, J. A., & Olaya Florez, J. J. (2011). Electric arc spray coatings for the naval industry. *Ship Science & Technology*, 4(8), 31–39. <https://doi.org/10.25043/19098642.44>
21. Chen T., Yung T., Chou C., Wang Y. (2024). Investigating the corrosion resistance of Zn and Al coating deposited by arc thermal spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 484, 130684. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130684>
22. Zhou G., Wang Z., Zhang S. (2024). Study on microstructure and cavitation corrosion resistance of 304 stainless steel after surface rolling. *Materials Chemistry and Physics*, 328, 130040. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.13004>
23. C.M. Hansson and L.H. Hansson, Cavitation Erosion, AS Handbook, Vol 18, P.J. Blau, Ed., ASM International, Material Park, OH, 1992, p 214-220.
24. P.V. Marques and C.R.C. Lima, Studies of Cavitation Resistan Thermal Sprayed and Welded Coatings, Thermal Spray 2003 Advancing the Science and Applying the Technology, Vol 1, B.R Marple and C. Moreau, Ed., 5-8 May 2003, ASM International Orlando, FL, 2003, p 389-393.
25. M. Hauer, R. Banaschik, W. Kroemmer, and K.-M. Henkel. (2019). Variation of Heat Input and Its Influence on Residual Stresses an Coating Properties in Arc Spraying with Different Gas Mixtures. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(1-2), p 40-52.
26. S. Krebs, S. Kuroda, H. Katanoda, F. Gaertner, T. Klassen, H Araki, and S. Frede. (2017). Warm Spraying of High-Strength Ni-AlBronze: Cavitation Characteristics and Property Prediction. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(1-2), p 265-277.

27. L. Pawłowski, *The Science and Engineering of Thermal Spraying Coatings*, 2nd ed. Wiley, Hoboken, 2008.
28. H. Assadi, H. Kreye, F. Gärtner, and T. Klassen (2016). Cold Spraying—A Materials Perspective, *Acta Mater.*, 116, p 382-407.
29. H.-A. Mathesius and W. Krommer, *Practice of Thermal Spraying: Guidance for Technical Personnel*, 2nd ed. DVS Media, Düsseldorf, 2014.
30. T. Stoltenhoff, H. Kreye, and H.J. Richter (2002). An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 11(4), p 542-550.
31. T. Stoltenhoff, H. Kreye, and H.J. Richter, An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 2002, 11(4), p 542-550.
32. H. Assadi, F. Gärtner, and T. Klassen (2016). Modeling and Simulation of Cold Spray: Chapter 3, High Pressure Cold Spray, ed. by C.M. Kay, J. Karthikeyan (ASM International, Materials Park, pp. 67-98.
33. B. Wielage, A. Wank, H. Pokhmurska, T. Grund, C. Rupprecht, G. Reisel, and E. Friesen (2006). Development and Trends in HVOF Spraying Technology. *Surface and Coating Technology*, 201(5), p 2032-2037.
34. K. Dobler, H. Kreye, and R. Schwetzke. (2000). Oxidation of Stainless Steel in the High Velocity Oxy-Fuel Process, *J. Therm. Spray Technol.*, 9(3), p 407-413.
35. H.J. Richter and G. May, Fluid Mechanic and Thermal Aspects of High Velocity Spraying, in *Proc. HVOF Spraying: November 16-17, 2000*, Erding, Germany, ed. By P. Heinrich (Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., 2000), pp. 19-28.
36. J.-H. Kim and M.-H. Lee (2010). A Study on Cavitation Erosion and Corrosion Behavior of Al- Zn-, Cu-, and Fe-Based Coatings Prepared by Arc Spraying, *J. Therm. Spray Technol.*, 19(6), p 1224-1230.
37. GTV Verschleißschutz GmbH, Krebs Korrosionsschutz GmbH Rostock, EEW SPC GmbH, *Thermal Sprayed Aluminium: a Brand-New Robot-Based Technological Coating Concept*, 2017.

38. M. Hauer, K.M. Henkel, S. Krebs, and W. Kroemmer (2017). Study of Traverse Speed Effects on Residual Stress State and Cavitation Erosion Behavior of Arc-Sprayed Aluminum Bronze Coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 26(1-2), p 217-228.
39. M. Hauer, K.M. Henkel, S. Krebs, and W. Kroemmer (2018). Alternative Gas Mixtures in Arc Spraying: A Chance to Improve Coating Properties and Residual Stress States, *J. Therm. Spray Technol.*, 27(1-2), p 106-118.
40. G. Jandin, H. Liao, Z.Q. Feng, and C. Coddet (2003). Correlations Between Operating Conditions, Microstructure and Mechanical Properties of Twin Wire Arc Sprayed Steel Coatings, *Mater. Sci. Eng. A*, 349(1-2), p 298-305.
41. C. Rupprecht, Efficient Solutions for Wire Arc Spraying: Presentation at the International Thermal Spray Conference and Exposition 2017, June 8, 2017.
42. S. Kuroda, M. Watanabe, K. Kim, and H. Katanoda (2011). Current Status and Future Prospects of Warm Spray Technology, *J. Therm. Spray Technol.*, 20(4), p 653-676.
43. H. Katanoda, B. Sun, N. Ohno, H. Fukanuma, S. Kuroda, S. Watanabe, and O. Ohashi, Design and Development of HighPressure Warm Spray Gun, Innovative Coating Solutions For the Global Economy: International Thermal Spray Conference & Exposition (ITSC 2013); Busan, Republic of Korea, 13-15 May 2013, ed. by R. Lima (Curran, Red Hook, 2014), pp. 196-199.