

Казимиренко Ю.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Лебедєва Н.Ю.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Макруха Т.О.

Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОКРИТТЯ З 65Г, НАПОВНЕНОГО АЛЮМОСИЛІКАТНИМИ МІКРОСФЕРАМИ, У СУДНОРЕМОНТНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Стаття присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми судноремонту, пов'язаною з розробкою нових зносостійких покриттів для відновлення та ремонту судових механізмів. Аналіз сучасних технологій показав доцільність використання електродугового напилення з додаванням у зону дуги дисперсних наповнювачів. Для дослідження обрано композиційне покриття з суцільнотягнутого дроту марки 65Г, яке нанесено на підкладку зі сталі марки Ст3. На відміну від аналогів з тугоплавкими керамічними порошками до складу покриттів додано зольні мікросфери алюмосилікатного складу. Експериментально досліджено зносостійкість та мікротвердість покриттів, для чого застосовано методи механічних випробувань за стандартними методиками. Одержані результати порівняно з покриттями без наповнювача.

Результати випробувань показали, що зносостійкість покриттів, наповнених мікросферами, приблизно на 25% вище ніж у покриттів без наповнювача, що пояснюється особливостями структури покриттів та підтверджується зростанням мікротвердості сталеві матриці приблизно 17%. Покриття композиції 65Г-АСПМ мають пористу полідисперсну структуру з рівномірно розташованими сферичними включеннями діаметром 200...400 мкм, навколо яких у сталевій матриці формуються мікронапруження. Додавання алюмосилікатних мікросфер сприятиме підвищенню об'ємної кількості пор приблизно на 10%, які під час тертя в умовах змащування заповнюються мастилом.

За допомогою методів системного аналізу, а саме SWOT-аналізу, визначено переваги та недоліки використання композиційних покриттів з 65Г, наповнених алюмосилікатними мікросферами, у сучасних технологіях судноремонту. Результати досліджень можуть бути застосовані для відновлення зношених деталей та обладнання, зокрема судових насосів. Подальші перспективи роботи авторів пов'язані з розробкою певних технологічних процесів нанесення покриттів та практичних рекомендацій експлуатації деталей.

Ключові слова: судові деталі, механізми, зносостійкість, композиційні покриття, зольні мікросфери.

Постановка проблеми. Сучасні події в Україні показали стратегічне значення суднобудівної та судноремонтної галузей, від яких залежить розвиток логістичної системи та підвищення рівня обороноздатності країни. У важких умовах роботи зруйнованих підприємств пріоритетним напрямком суднобудування слід вважати судноремонт. Проведення ремонтних заходів технічних засобів, машинних агрегатів, двигунів, судових систем, розробка технічних рішень з підвищення ресурсу їх експлуатації є складною технічною задачею, пов'язаною з вибором і розробкою нових матеріалів, методів зміцнення та обробки поверхні. До матеріалів деталей судових механізмів висунуто

вимоги зносостійкості, витривалості, демпфірувальної здатності, корозійної стійкості, технологічності [1, с. 119–127]. Для ефективного захисту від абразивного зношування сталевих виробів застосовуються: електроерозійне легування, поверхневе пластичне деформування, наплавлення зносостійким матеріалом, напайка або приварювання твердосплавних пластин та сегментів, нанесення композиційних покриттів [2, с. 18–24]. Вибір методу безпосередньо залежить від технічних умов експлуатації, виробничих ресурсів та певних економічних чинників. Найбільшою ефективністю для захисту деталей та механізмів обладнання від корозійного та абразивного зно-

шування вважається електродугове напилення. Підвищення механічних та експлуатаційних характеристик покриттів, зокрема міцності та зносостійкості, є важливою науково-технічною проблемою судноремонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним зі шляхів вирішення поставленої проблеми є формування на поверхні конструкційної сталі тонкого щільного шару покриття більшої твердості, ніж у металу-основи [2, с. 105–112]. Проте важливим питанням є вірний вибір матеріалу, до якого крім твердості та міцності, пред'являються вимоги термічної стабільності, корозійної стійкості та низької інтенсивності зношування. Підвищену зносостійкість у абразивному середовищі мають пружинно-ресорні сталі ферито-перлітної структури, такі як 65Г (ДСТУ 8429:2015). В роботі [4, с. 213–223] розглянуто теоретично-технологічні передумови підвищення її зносостійкості загартуванням із середнім відпуском або електроімпульсною обробкою. Автори роботи [5, с. 156–161] показали, що ефективність поверхневого зміцнення сталі 65Г пов'язана з формуванням нанокристалічної структури, що підтверджується результатами експериментальних робіт щодо впливу механоімпульсної обробки на опір контактної втоми.

Авторами робіт [6, с. 5; 7, с. 97] розглянуто технологічні питання щодо нанесення електродугових покриттів з дротів марок 65Г і Св-08Г2С, підвищену твердість яких забезпечує формування «частково термічно стабілізованої полігонізаційної структури» шляхом застосування їх додаткової деформації з термічною обробкою. Цей ефект можна посилити утворенням у структурі покриттів зміцнювальної фази. В роботі [6, с. 5; 8, с. 65] автори застосовують порошок карбиду титану TiC. Напилені електродуговим методом покриття піддаються впливу передрекристалізаційної термічної обробці в температурному діапазоні 300...500 °С, після проведення якої спостерігається значне (на 26%) підвищення твердості, що пояснюється додатковим наклепом під дією впливу частинок на сталеву поверхню підкладки. Зменшення концентрації напружень у структурно-неоднорідних композиціях можливо введенням до їх складу дисперсних наповнювачів сферичної форми. Такий досвід був викладений авторами у статтях [9, с. 82–83; 10, с. 39–41], де при напилюванні сталевго дроту марки 65Г (ДСТУ 3671-97) у зону дуги введено зольні мікросфери алюмосилікатного складу. Покриття нанесено на сталь звичайної якості марки Ст3 (ДСТУ 2651:2005),

яка широко застосовується у суднобудівних технологіях, зокрема для виготовлення елементів корпусів суднового устаткування та механізмів загального призначення. В роботі [9, с. 81–86] проаналізовано фізико-хімічні процеси формування покриття на сталевій підкладці зі значним (на 8...22%) ефектом зміцнення. Вплив алюмосилікатних мікросфер на корозійну стійкість та теплозахисні властивості електродугових покриттів з 65Г проаналізовано у роботі [10, с. 38–44]. Одержані результати потребують узагальнення та доповнення дослідженнями зносостійкості, на підставі чого можна визначитись з перспективами їх подальшого застосування у технологіях судноремонту.

Мета роботи – дослідити перспективу використання електродугових покриттів з 65Г, наповнених алюмосилікатними мікросферами, у технологіях ремонту та відновлення судових механізмів шляхом експериментального дослідження їх зносостійкості.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Покриття товщиною 1,5 мм нанесено електродуговим методом на пластину розміром 140–100–3,5 мм зі сталі марки Ст3 (ДСТУ 2651:2005). Для формування покриття застосовано суцільнотягнутий дріт ($d = 2$ мм) марки 65Г (ДСТУ 3671-97) та зольні мікросфери «Піносфера» алюмосилікатного складу (АСМП) марки МПк200-400 (виробник – ТОВ «Виробниче об'єднання Мікросфери», Україна). Вибір мікросфер обумовлено їх здатністю гасити коливання та стримувати усадочні процеси при формуванні композиційних матеріалів [10, с. 28–34]. Режими попередньої струменево-абразивної обробки сталеві пластинки та електродугового напилення (сила струму – 80...160 А, тиск повітря – 0,4...0,6 МПа, швидкість подачі дроту – 4,2 м/хв, відстань від сопла до напилювальної поверхні – 80 мм) покриття обрано на підставі рекомендацій авторів робіт [7, с. 95; 11, с. 37; 12, с. 230]; об'ємний вміст мікросфер склав 10...25%.

Дослідження зносостійкості проводились за схемою вал–колодка (тертя ковзання) на машині тертя СМЦ-2 при обертовій швидкості 0,8 м/с, при навантаженні 4 МПа та обмеженому змащенні маслом М10Г2К. Для випробувань застосовувались зразки дискової форми ($d = 20$ мм, $d_{\text{верх}} = 11$ мм, $d_{\text{нижн}} = 12$ мм). Зношування зразків визначалося за зменшенням маси і розмірів зразків, змінами геометрії поверхні після проходження кожних 10 км шляху загальною протяжністю 40 км протягом 14 год. Для вимірювань маси

застосовано аналітичні ваги GR200; інформація щодо геометрії поверхні реєструвалася за допомогою профілограм. Зносостійкість розглянуто як величину, яка зворотна швидкості зношування і визначається у г/км. Результати вимірювань оброблено методами математичної статистики та для більшої наочності представлені на рис. 1 у вигляді гістограм, на яких нанесено значення втрати маси зразків з покриттями, наповненими АСПМ з об'ємним вмістом 20% і покриттями без наповнювача.

Результати випробувань показали, що зносостійкість покриттів, наповнених мікросферами, приблизно на 25% вище, ніж у покриттів без наповнювача, що пояснюється особливостями структури покриттів. Покриття композиції 65Г-АСПМ мають пористу (21%) полідисперсну структуру з рівномірно розташованими сферичними включеннями діаметром 200...400 мкм. Алюмосилікатні мікросфери є продуктами золоуносу ТЕС та являють собою тугоплавкі неорганічні сполуки мінералогічного складу [13, с. 28-34]. При електродуговому напиленні вони зберігають свою сферичну форму, не утворюють склофази [9, с. 81-86], мають насипну щільність 50...60 кг/м³, тому на відміну від частинок TiC та Al₂O₃, які додавали до покриттів з 65Г автори роботи [7, с. 94-99], не сприяють явищу додаткового наклепу. Додавання алюмосилікатних мікросфер до складу електродугових покриттів з 65Г сприятиме підвищенню об'ємної кількості пор приблизно на 10%, які під час тертя в умовах змашування заповнюються мастилом.

Мікротвердість сталеві матриці покриття з 65Г визначили за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 за ДСТУ 3651-97 з навантаженням на індентор 50 мг: на рис. 2 наведено фотогра-

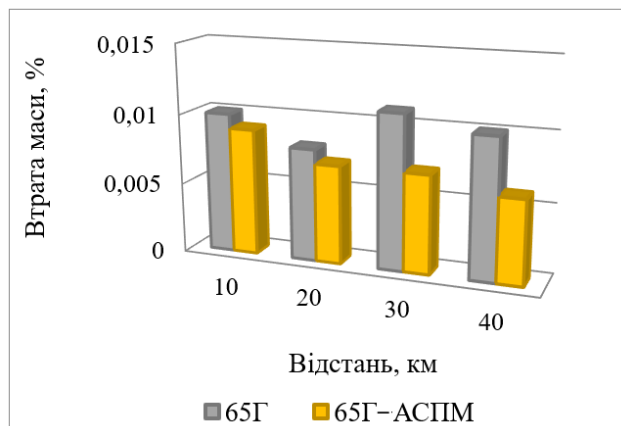


Рис. 1. Зміна маси покриттів протягом випробувань

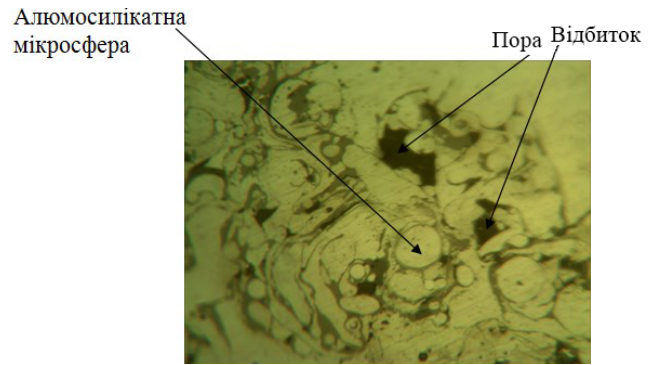


Рис. 2. Мікроструктура (оптична фотографія, ×350) покриття композиції 65Г-АСПМ (20% об'ємн.)

фію мікроструктури покриття композиції 65Г-АСПМ, зробленій на оптичному мікроскопі БЮЛАМ-І, можна побачити відбиток індентора. Через пористість вимірювання мають велику похибку (±14%), опосередковані результати показали, що мікротвердість покриттів композиції 65Г-АСПМ ($H_{\mu 50} = 3,59$ ГПа) на 17% перевищує мікротвердість ($H_{\mu 50} = 3,47$ ГПа) покриття без наповнювача.

Ефект зміцнення можна пояснити формуванням у сталевій матриці навколо сферичних включень мікронапружень, для визначення яких використано авторську методику [14, с. 90-94]. Локалізацію деформації (рис. 3) описано через співвідношення умовних модулів стискання матриці K_m і мікросфери K_m як теоретично визначеними величинами, що враховують не тільки пружні характеристики матеріалів матриці та наповнювача, а і розміри пор, сферичних включень, товщину стінки мікросфери.

Побудована за результатами розрахунків залежність (див. рис. 3, лінія 1) свідчить про

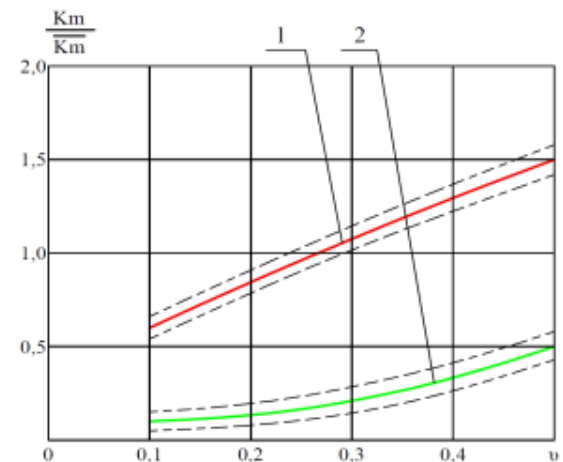


Рис. 3. Інтенсивність мікронапружень в композиційних покриттях, наповнених мікросферами

Ситуаційний аналіз перспектив застосування покриттів 65Г–АСПМ у судноремонтних технологіях

Сильні сторони (Strengths)	Можливості розвитку (Opportunities)
1. Можливість виконання ремонтних робіт в порту і на судні та швидкого відновлення малогабаритних деталей. 2. Можливість поєднання комплексу цінних властивостей (зносостійкості, термостійкості, корозійної стійкості, демпфірувальної здатності).	1. Розробка нових складів композиційних покриттів поширює номенклатуру ремонтних матеріалів і спрямована на ресурсозбереження. 2. Застосування зольних мікросфер для формування покриттів як один із напрямків рециклінгу виробничих відходів.
Слабкі сторони (Weakness)	Загрози (Threats)
1. Низький коефіцієнт використання матеріалу. 2. Необхідність постійного аналізу фізико-хімічних процесів для забезпечення стабільної міцності зчеплення покриття з поверхнею деталі.	1. Зростання цін на енергоносії та здороження виконання ремонтних робіт. 2. Дефіцитність дроту 65Г. 3. Необхідність оновлення та амортизації обладнання.

зростання напружень при збільшенні об'ємного вмісту мікросфер; пунктирними лініями показано розбіг значень в залежності від пористості сталевих матриці (10...20%). Підвищення концентрації мікронапружень обумовлює зниження міцності зчеплення композиційного покриття з підкладкою і залежить від фізико-хімічних процесів. Для порівняння на графік (див. рис. 3, лінія 2) нанесено теоретично-експериментальні значення для електродугових покриттів з Св-08Г2С, наповнених порожніми скляними мікросферами натрій-силікатного складу.

Перспективи подальшого впровадження розроблених покриттів у судноремонтні технології проаналізовано за допомогою SWOT-аналізу [15, с. 147-157]. Результати наведені у табличній формі (табл. 1) і містять оцінку слабких і сильних сторін з визначенням можливостей розвитку та ризиків.

Виконаний ситуаційний аналіз (див. табл. 1) допоможе розвинути здобуток авторів з подальшим доопрацюванням та усуненням слабких місць.

Результати досліджень спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми судноремонту, пов'язаної з розробкою нових зносостійких покриттів для відновлення механізмів і обладнання, можуть бути застосовані для ремонту зношених деталей, зокрема для суднових насосів. Подальші перспективи роботи авторів пов'язані з розробкою певних технологічних процесів нанесення покриттів та практичних рекомендацій експлуатації деталей.

Висновки

1. Експериментальні випробування показали, що зносостійкість покриттів композиції 65Г–АСПМ, приблизно на 25% вище, ніж у покриттів без наповнювача, що пояснюється особливостями структури покриттів та підтверджується зростанням мікротвердості сталевих матриці приблизно 17%.

2. Покриття композиції 65Г–АСПМ мають пористу полідисперсну структуру зі сферичними вклученнями, навколо яких у сталевій матриці формуються мікронапруження. Додавання алюмосилікатних мікросфер сприятиме підвищенню об'ємної кількості пор приблизно на 10%, які під час тертя в умовах змащування заповнюються мастилом.

3. За допомогою методів системного аналізу, а саме SWOT-аналізу, визначено переваги та недоліки використання композиційних покриттів з 65Г, наповнених алюмосилікатними мікросферами, у сучасних технологіях судноремонту.

Список літератури:

1. Коваленко І. В. Обґрунтування вибору двошарової сталі для виготовлення суднових допоміжних механізмів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2018. 36. С. 119–127.
2. Тарельник В. Б., Саржанов Б. О., Гапон О. О. Новий спосіб відновлення і зміцнення деталей з листової сталі, що піддаються в процесі експлуатації абразивному зносу. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2019. 1–2 (35–36). С. 18–24.
3. Савуляк В. І., Шенфельд В. Й. Вплив мікроструктури високовуглецевих шарів, отриманих методом електродугового наплавлення з використанням вуглецевих волокнистих матеріалів на параметри зносостійкості в умовах абразивного середовища. *Problems of Tribology*. 2015. Том 77, 3. С. 105–112.
4. Дворук В. І., Борак К. В., Добранський С. С. Дослідження зносостійкості сталі 65Г з різними фізико-механічними властивостями при зношуванні в абразивній масі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. 46. С. 213–223.
5. Шалько А. В., Чайковський Б. П., Ярошович І. Г. Вплив поверхневої наноструктури на контактну втому 65Г. *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. З. Їжицького*. 2015. Том 17 № 1 (61) частина 4. С. 156–161.

6. Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Шкурат С. І., Лимар О. О. Формування термічної поліганізаційної субструктури з підвищеними властивостями в електродугових покриттях. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. 10 (1335). С. 3–10.
7. Карпеченко А. А., Бобров М. М. Вплив передрекристиалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості функціональних електродугових композиційних покриттів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. 2. С. 94–99.
8. Dubovoy O. M., Karpechenko A. A., Bobrov M. M., Gerasin O. S., Lymar O. O. Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system / *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, № 2. pp. 63–68.
9. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Застосування зольних мікросфер для формування композиційних покриттів на сталевій поверхні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72). 3. С. 81–86.
10. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Корозійна стійкість і теплозахисні властивості композиційних покриттів, наповнених зольними мікросферами. *Технічні науки та технології*. 2022. 1 (27). С. 38–44.
11. Дубовий О. М., Бобров М. М., Неделько Ю. Є., Чечель О. В. Вплив параметрів режиму напилення покриттів щодо отримання наномасштабної субструктури з підвищеною стабільністю / *Зб. наук. праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2016. № 4. С. 35–40.
12. Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Жданов О. О., Макруха Т. О., Неделько Ю. Є. Формування нанорозмірної поліганізаційної субструктури та її вплив на фізико-механічні властивості металів і сплавів та напилених покриттів / *Металлофізика і новітні технології*. 2017. Т. 39, № 2. С. 209–243.
13. Демченко В. О., Сімячко О. І., Свідерський В. А. Дослідження мінералогічного складу, структури і властивості поверхні зольних мікросфер України. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. 2017. 6. С. 28–34.
14. Kazymyrenko, Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials. *The advanced science journal*. 2016. 1. P. 90–94.
15. Прокопчук Ю. О. та ін. Системи прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах: монографія. Дніпропетровськ-Павлоград: АРТ-Синтез-Т, 2014. Т. 1. 456 с.

Kazymyrenko Yu.O., Lebedeva N.Yu., Makrukha T.O. PERSPECTIVES OF APPLICATION OF COATINGS OF 1066 (65Г) STEEL, FILLED WITH ALUMINOSILICATE MICROSPHERES, IN SHIP REPAIR TECHNOLOGIES

The present article is devoted to solving an important scientific and technical problem of ship repair related to the development of new wear-resistant coatings for the restoration and repair of ship mechanisms. Analysis of modern technologies showed the feasibility of using electric arc spraying with the addition of dispersed fillers to the arc zone. A composite coating made of continuously drawn wire made of 1066 (65Г) grade steel, which was applied to a substrate made of A284Gr.D (Cm3) grade steel, was chosen for the study. Unlike analogues that contain refractory ceramic powders, ash microspheres of aluminosilicate composition were added to the composition of studied coatings. Wear resistance and microhardness of coatings were experimentally investigated, for which mechanical testing methods were applied according to standard methods. The obtained results were compared with results of studies of coatings without filler.

The results of the tests showed that the wear resistance of coatings, filled with microspheres, is about 25% higher than that of coatings without filler, which is explained by the peculiarities of the structure of the coatings and is confirmed by an increase in the microhardness of the steel matrix by about 17%. Coatings of 1066 steel – ASHM (aluminosilicate hollow microspheres) composition have a porous polydisperse structure with evenly spaced spherical inclusions with a diameter of 200...400 μm, around which microstresses are formed in the steel matrix. The addition of aluminosilicate microspheres will contribute to an increase in the volumetric quantity of pores by approximately 10%, which will be filled with lubricant during friction under lubrication conditions.

Using the methods of system analysis, namely SWOT analysis, the advantages and disadvantages of using composite coatings from 1066 steel filled with aluminosilicate microspheres in modern ship repair technologies are determined. Research results can be applied in the restoration of worn parts and equipment, in particular, ship pumps. Further perspectives of the authors' work are related to the development of certain technological processes of coating as well as of practical recommendations for the operation of parts.

Key words: ship parts, mechanisms, wear resistance, composite coatings, ash microspheres.

Подяка. Автори висловлюють вдячність Збройним Силам України та всім захисникам України за їх мужність та силу, завдяки яким є можливість жити та працювати під мирним небом, навіть у лихоліття війни.