

УДК 621.930

DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-152-171

**ОГЛЯД МЕТОДІВ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ
У СУДНОБУДУВАННІ ТА СУДНОРЕМОНТІ**

О.І. Стальніченко

проф, зав. кафедри «Технологія матеріалів»

tmkafedra@bigmir.net

Є.О. Науменко

к.т.н., доцент кафедри «Технологія матеріалів»

naumenko.e.o@op.edu.ua

К.О. Крейцер

к.т.н., ст. викладач кафедри «Технологія матеріалів»

kreycerk@gmail.com

Є.М. Козішкурт

д.філ.(PhD), ст. викладач кафедри «Технологія матеріалів»

koziskurtevgen@gmail.com

Е.П. Богомолов

ст. викладач кафедри «Технологія матеріалів»

boginerged@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація: Плазмово-порошкове наплавлення є високотехнологічним процесом, що використовується для нанесення захисних і відновлювальних покриттів на різні матеріали, найчастіше метали. Цей метод особливо цінується за високу точність, потужність і керованість плазмової дуги, що дає змогу досягати високоякісних покриттів із поліпшеними механічними властивостями та зносостійкістю.

Сучасний стан технології плазмово-порошкового наплавлення характеризується постійним прагненням до оптимізації процесів з метою підвищення ефективності наплавлення, поліпшення адгезії покриттів і зниження пористості. Розвиток комп'ютерних технологій і автоматизації сприяв удосконаленню управління плазмовою дугою і точності подачі порошкових матеріалів. Однак проблеми в цій галузі залишаються актуальними. Однією з головних задач є управління тепловими режимами процесу, оскільки надлишковий тепловий вплив може призвести до деформації основного матеріалу і погіршення властивостей покриття. Також значна увага приділяється розробці нових композиційних порошків, які забезпечували б поліпшені експлуатаційні характеристики та водночас були б сумісні з екологічними стандартами.

Проблема забезпечення рівномірності розподілу порошку по плазмовому струменю, як і раніше, є актуальною, оскільки це безпосередньо впливає на якість і властивості покриттів. Вивчення взаємодії між плазмовим струменем і порошковим матеріалом залишається предметом наукових досліджень, включаючи динаміку частинок і теплообмін. Загалом, плазмово-порошкове наплавлення продовжує розвиватися як важливий інструментальний метод у матеріалознавстві, здатний задовольнити зростаючі вимоги промисловості до якості, довговічності та відновлення виробів.

Ключові слова: плазмово-порошкове наплавлення, порошкові матеріали, нанесення покриття, режими процесу.

© Стальніченко О.І., Науменко Є.О., Крейцер К.О., Козішкурт Є.М., Богомолов Е.П., 2023

UDC 621.930

DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-152-171

OVERVIEW OF PLASMA POWDER SURFACING METHODS IN SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR

O. Stalnichenko

Ph.D, Professor, Head of the Department «Materials technology»
tmkafedra@bigmir.net

Ye. Naumenko

Ph.D., associate professor of the Department «Materials technology»
naumenko.e.o@op.edu.ua

K. Kreitser

Ph.D., Senior lecturer of the Department «Materials technology»
kreycerk@gmail.com

Ye. Kozishkurt

Ph.D, Senior lecturer of the Department «Materials technology»
igonua@gmail.com

E. Bogomolov

Senior lecturer of the Department «Materials technology»
boginerged@gmail.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *Plasma powder surfacing is a high-tech process used to apply protective and restorative coatings to various materials, most commonly metals. This method is particularly valued for the high precision, power and controllability of the plasma arc, which makes it possible to achieve high-quality coatings with improved mechanical properties and wear resistance.*

The current state of plasma powder surfacing technology is characterized by a constant striving for process optimization to increase deposition efficiency, improve coating adhesion and reduce porosity. Advances in computer technology and automation have improved plasma arc control and powder feeding accuracy.

However, problems in this area remain relevant. One of the main tasks is to control the thermal conditions of the process, since excessive thermal effects can lead to deformation of the base material and deterioration of coating properties. Considerable attention is also paid to the development of new composite powders that would provide improved performance and at the same time be compatible with environmental standards.

The problem of ensuring the uniformity of powder distribution in the plasma jet is still relevant, as it directly affects the quality and properties of coatings. The study of the interaction between the plasma jet and the powder material remains a subject of scientific research, including particle dynamics and heat transfer.

In general, plasma powder surfacing continues to develop as an important tool method in materials science that can meet the growing demands of industry for quality, durability, and product recovery.

Keywords: *plasma powder surfacing, powder materials, coating, process modes.*

Вступ. Плазмово-порошкове наплавлення є перспективним напрямком досліджень у галузі суднобудування і судноремонту та відіграє важливу роль у підвищенні продуктивності та довговічності судових деталей.

Плазмово-порошкове наплавлення – це метод інженерії поверхні, який полягає в осадженні порошкового матеріалу на поверхню підкладки за допомогою плазмового пальника. Цей метод широко використовується в судноремонті для ремонту зношених деталей, захисту поверхонь від корозії і зносу, підвищення міцності і терміну служби морських суден, а також поліпшення їх експлуатаційних характеристик в жорстких умовах навколишнього середовища.

Використання плазмово-порошкового наплавлення в судноремонті привертає значну увагу дослідників та інженерів завдяки багатьом перевагам над традиційними методами зварювання та нанесення покриттів. Наприклад, воно забезпечує високий рівень точності, гнучкості та контролю над процесом нанесення матеріалу, що дозволяє створювати індивідуальні покриття зі специфічними властивостями та характеристиками. Крім того, використання плазмово-порошкового наплавлення може зменшити потребу в дорогих і трудомістких процесах механічної обробки та шліфування, тим самим зменшуючи виробничі витрати і час виконання замовлення.

В останні роки розробка передових методів і матеріалів для плазмово-порошкового наплавлення розширила спектр застосування цієї технології в судноремонті. Сюди входить використання нових порошкових матеріалів, таких як композити з металевою матрицею, кераміка і полімери, а також інтеграція нових технологічних параметрів і стратегій контролю для оптимізації процесу осадження і підвищення якості покриттів.

Незважаючи на ці досягнення, ще багато чого належить дізнатися про потенціал і обмеження даного способу в суднобудуванні та судноремонті.

Мета статті – надати всебічний огляд сучасного стану знань у галузі плазмово-порошкового наплавлення в суднобудуванні та судноремонті, висвітлити його потенціал та обмеження, а також визначити майбутні напрямки досліджень для подальшого розвитку цієї технології в морській індустрії.

Основний матеріал. *Порошкові матеріали*, що використовуються для плазмового порошкового наплавлення в суднобудуванні, відіграють вирішальну роль у визначенні властивостей і експлуатаційних характеристик відновлених деталей. Можна використовувати різні типи порошоків, включаючи метали, сплави та композити. Вибір порошкового матеріалу залежить від конкретних вимог до відновлюваної деталі, таких як механічна міцність, зносостійкість і корозійна стійкість.

Одним з найпоширеніших порошкових матеріалів для плазмового порошкового наплавлення в суднобудуванні є сплави на основі нікелю. Ці сплави мають високу міцність, зносостійкість і корозійну стійкість, що робить їх придатними для відновлення таких деталей, як гребні гвинти і клапани. Згідно [1-2] використання порошку сплаву на основі нікелю для відновлення судового гвинта показало, що відновлений гвинт демонструє покращену зносостійкість і корозійну стійкість порівняно з оригінальним гвинтом.

Іншим широко використовуваним порошковим матеріалом є сплави на основі титану. Ці сплави мають високу міцність і корозійну стійкість, що робить їх придатними для відновлення таких деталей, як компоненти двигунів. Використання порошку сплаву на основі титану для відновлення гільзи циліндра судового дизельного двигуна [3] виявило, що відновлена гільза демонструє підвищену зносостійкість і корозійну стійкість порівняно з оригінальною.

На додаток до порошків на основі металів, композитні порошки також можуть використовуватися в плазмовому порошковому наплавленні для суднобудування та судноремонту. Наприклад, у роботі [4] вивчалася використання композитного порошку, що складається з титанових і керамічних частинок, для відновлення судового керма. Дослідники виявили, що відновлене кермо демонструє покращену зносостійкість і корозійну стійкість порівняно з оригінальним кермом.

Порошкові матеріали, що використовуються для плазмового порошкового наплавлення, також можна оптимізувати шляхом додавання різних типів армуючих частинок. Ці частинки можуть покращити механічні та трибологічні властивості наплавлених шарів. Наприклад, у дослідженні [5] встановлено вплив додавання частинок карбіду вольфраму (WC) до порошку сплаву на основі нікелю на властивості наплавлених шарів. Дослідники виявили, що додавання частинок WC значно покращило твердість і зносостійкість шарів.

Аналогічно, у дослідженні [6] вивчалася використання порошку сплаву на основі нікелю з частинками карбіду кремнію (SiC) для відновлення судового гвинта. Дослідники виявили, що додавання частинок SiC покращило зносостійкість і корозійну стійкість відновленого гвинта. Крім того, дослідження показало, що ефективність осадження порошку збільшилася з додаванням частинок SiC.

Сплави на основі кобальту також популярні в суднобудуванні завдяки своїм властивостям стійкості до високих температур і зносостійкості. У дослідженнях [7-8] вивчали трибологічну поведінку покриттів зі сплавів на основі кобальту, нанесених методом плазмового напилення. Дослідження показали, що використання сплавів на основі кобальту дозволило отримати покриття з відмінними властивостями зносостійкості та корозійної стійкості.

Нержавіючі сталі також широко використовуються в плазмовому порошковому наплавленні в суднобудуванні завдяки своїм чудовим антикорозійним властивостям. Дослідження [9] вивчали вплив параметрів плазмового напилення на мікроструктуру і механічні властивості покриттів з нержавіючої сталі 03X17N14M3. Дослідження показало, що використання порошків нержавіючої сталі 03X17N14M3 при плазмовому напиленні призводить до отримання покриттів з покращеними механічними властивостями та корозійною стійкістю.

Сплави на основі алюмінію також використовуються в плазмовому порошковому наплавленні завдяки своїм чудовим властивостям корозійної стійкості. У дослідженні [10] вивчали вплив параметрів плазмового напилення на механічні властивості покриттів з алюмінієвого сплаву B95. Дослідження показало, що використання порошків алюмінієвого сплаву B95 при плазмовому напиленні призвело до отримання покриттів з покращеними механічними властивостями та корозійною стійкістю.

Інші типи армуючих частинок, такі як оксид графену (ОГ), діоксид титану (TiO_2) і вуглецеві нанотрубки (ВНТ), також були досліджені на предмет їх потенціалу в поліпшенні властивостей шарів плазмового порошкового наплавлення. У дослідженні [11] вивчалось використання порошку сплаву на основі нікелю з частинками ОГ для відновлення суднового клапана. Дослідники виявили, що додавання частинок ОГ покращило твердість і зносостійкість відновленого клапана.

Таким чином, додавання армуючих частинок до порошкових матеріалів, що використовуються для плазмового порошкового наплавлення, може значно покращити механічні та трибологічні властивості наплавлених шарів. Це має потенціал для підвищення продуктивності та довговічності відновлених деталей суден.

Сплави на основі нікелю, сплави на основі кобальту, нержавіючі сталі та сплави на основі алюмінію є загальнозживаними матеріалами, а додавання армуючих частинок може додатково покращити властивості наплавлених шарів.

Мікроструктура плазмово-порошкових покриттів залежить від ряду факторів, таких як хімічний склад порошкового матеріалу, параметри плазми, такі як температура, тиск та швидкість розпилювання, а також характеристики поверхні деталі. Дослідження мікроструктури плазмово-порошкових покриттів дозволяють встановити зв'язок між процесом наплавлення та механічними властивостями покриття.

Дослідження [12] показали, що мікроструктура плазмово-порошкових покриттів залежить від складу порошкового матеріалу та параметрів плазми. У разі наплавлення металевих покриттів вони мають переважно плоску, листовидну мікроструктуру з плоскими зернами, тоді як керамічні покриття мають зернисту мікроструктуру з круглими зернами. Крім того, мікроструктура покриттів може бути вплинута додатковими процесами, такими як термічна обробка та зміна тиску.

У дослідженні [13] були досліджені механічні властивості оксидних керамічних покриттів, що були напилені плазмою. Автором було виявлено, що механічні властивості покриттів значною мірою залежать від їх мікроструктури. Зокрема, було встановлено, що при зменшенні розміру частинок порошку та збільшенні швидкості напилення, мікроструктура покриття стає більш щільною, а його механічні властивості зростають. Також було показано, що додавання до порошку деяких елементів, таких як оксид алюмінію, може покращити механічну стійкість покриття шляхом утворення більш стійких кристалічних фаз в мікроструктурі.

У дослідженні [14] було досліджено вплив параметрів напилення на мікроструктуру та механічні властивості WC-Co покриттів, напилених плазмою. Авторами було показано, що збільшення швидкості напилення та зменшення розміру частинок порошку призводить до зменшення розмірів пірамідальних карбідних кристалів та збільшення кількості карбідних кристалів, що збільшує механічну міцність покриття. Також автори встановили, що додавання до порошку спеціальних присадок може покращити адгезію між покриттям та підкладкою та зменшити кількість тріщин в мікроструктурі покриття.

Отже, з обох досліджень видно, що мікроструктура покриття плазмово-порошкового напилення є важливим фактором, що визначає механічні властивості покриття. Зменшення розміру частинок порошку та збільшення швидкості напилення призводить до збільшення твердості та міцності покриттів, як показали

дослідження [14]. Вони досліджували мікроструктуру та механічні властивості WC-Co покриттів, напилені швидкісним плазмовим напиленням з використанням порошків з різними розмірами частинок. Результати показали, що зменшення розміру частинок порошку з 40 до 10 мкм і збільшення швидкості напилення з 100 до 200 м/с призвело до збільшення твердості з 1400 до 2100 HV та міцності з 46 до 70 МПа.

Дослідження [12] також зазначає, що механічні властивості покриттів плазмовим напиленням залежать від розміру та форми частинок порошку. Вони наводять приклад збільшення твердості Cr₃C₂-NiCr покриттів з 1000 до 1800 HV при зменшенні розміру частинок порошку з 40 до 5 мкм.

Отже, зменшення розміру частинок порошку та збільшення швидкості напилення призводить до покращення механічних властивостей покриттів, зокрема, збільшення твердості та міцності.

У [15] досліджується вплив різних параметрів на мікроструктуру та властивості покриттів, що були напилені плазмою. Автори наводять приклади зміни товщини, пористості та складу покриттів в залежності від параметрів напилення, таких як швидкість напилення, температура плазми та тип газу носія. Висновок авторів полягає в тому, що вибір параметрів напилення є критичним для отримання бажаної мікроструктури та властивостей покриття.

У роботі [16] автори досліджують вплив параметрів напилення на мікроструктуру та властивості покриттів з Al₂O₃ та Cr₂O₃. Автори з'ясували, що зменшення розміру частинок порошку та збільшення швидкості напилення призводить до збільшення щільності та зменшення пористості покриття. Крім того, було встановлено, що зменшення розміру частинок порошку сприяє утворенню більш однорідної мікроструктури.

У роботі [17] досліджуються різні технології термічного напилення матеріалів та їх можливі застосування. Автор описує різні типи обладнання та матеріали, що використовуються для термічного напилення, а також надає огляд технологій, які дозволяють підвищити ефективність напилення та отримати покриття з покращеними властивостями.

У роботі [18] автори надають огляд основних принципів та властивостей плазмового напилення. Вони описують процес напилення, різні типи плазмових пальників та їх характеристики, а також вплив параметрів напилення на якість та властивості отриманих покриттів. Також розглядаються нові матеріали, що використовуються для плазмового напилення та їх особливості.

Стаття [19] присвячена застосуванню термічного напилення у морському інженерному виробництві. У роботі досліджується використання плазмового напилення для створення захисного покриття на металевих поверхнях суден для запобігання корозії та забезпечення довговічності експлуатації. Автори наголошують на тому, що плазмове напилення дозволяє отримати високоякісні покриття з високою адгезією до основи та доброю механічною стійкістю, що робить його дуже популярним у морському виробництві.

У статті також розглядається використання різних матеріалів для термічного напилення, зокрема, згадуються такі матеріали як алюміній, нікель, нержавіюча сталь, карбід кремнію тощо. Автори також звертають увагу на важливість

правильного підбору матеріалу покриття для конкретного використання, що може покращити довговічність суден.

Стаття [20] містить огляд використання терморозпилювальних покриттів у морських умовах. Автори обговорюють різні типи покриттів, які використовуються в морських умовах, такі як антикорозійні покриття, зносостійкі покриття і покриття для теплоізоляції. Вони також розглядають проблеми, пов'язані з нанесенням покриттів у морському середовищі, такі як наявність солоні води і необхідність забезпечення стійкості покриттів до суворих умов морської води.

Автори наводять приклади конкретних застосувань термічних напилюваних покриттів у морській техніці, таких як використання алюмінієвих покриттів для захисту морських нафтогазових платформ, використання керамічних покриттів для теплоізоляції у вихлопних системах суден, а також використання корозійностійких покриттів на суднових гвинтах.

У статті також обговорюються різні процеси термічного напилення, які використовуються в морській техніці, включаючи полум'яне напилення, дугове напилення і плазмове напилення. Автори розглядають переваги та недоліки кожного процесу і наводять приклади конкретних застосувань кожного з них у морському машинобудуванні.

Автори [21] провели дослідження використання плазмово-порошкового наплавлення для захисту поверхні суден. У своїй роботі автори наводять огляд використання різних матеріалів, таких як алюміній, титан, нержавіюча сталь, карбід вольфраму та інші, для створення плазмово-наплавлених покриттів на поверхні суден.

Автори також зазначають, що плазмово-порошкове наплавлення дозволяє забезпечити високу міцність, зносостійкість та корозійну стійкість наплавлених покриттів на поверхні суден. Крім того, такі покриття дозволяють захистити поверхні суден від дії високих температур, абразивного зносу та інших факторів.

У дослідженні також наводяться приклади успішного використання плазмово-порошкового наплавлення в суднобудуванні. Наприклад, в одному з проектів було використано плазмово-наплавлені покриття для захисту поверхні трубопроводів, які перебували в умовах дії абразивного зносу та корозії в морській воді. Результати дослідження показали, що такі покриття дозволяють підвищити термін служби трубопроводів та знизити витрати на їх обслуговування.

Стаття [22] розглядає застосування технологій плазмового напилення для створення антикорозійних покриттів в морському середовищі. Автори статті розглядають проблему корозії суден та структур, що експлуатуються в морському середовищі, і показують, що застосування термічного напилення може бути відмінним варіантом для створення антикорозійних покриттів з високою стійкістю до агресивного морського середовища.

Стаття включає огляд використання різних матеріалів для створення покриттів, таких як алюміній, цинк та сплави на основі алюмінію та цинку. Вона також досліджує різні методи підготовки поверхні, які можуть бути використані перед нанесенням покриття, такі як шліфування, піскоструминна очистка та хімічне очищення.

Також наведені результати досліджень щодо стійкості покриттів до корозії, в яких автори порівнюють різні матеріали та методи підготовки поверхні. Також розглядаються різні фактори, що впливають на ефективність антикорозійних покриттів, такі як товщина покриття та технічні параметри процесу напилення.

Стаття [23] присвячена дослідженню застосування термічного напилення для забезпечення корозійного захисту в морському середовищі. Автор розглядає різні типи термічного напилення, такі як плазмове напилення, напилення високошвидкісними плазмовими струменями, термічне напилення порошком, напилення провідником, а також їх застосування для захисту суднових конструкцій від корозії.

У статті описані різні види корозії, зокрема гальванічна корозія, корозія в результаті ударів води, абразивна корозія і корозія, що виникає в результаті дії солей із морської води на метал. Для кожного типу корозії автори наводять приклади використання термічного напилення для захисту суднових конструкцій.

Автори статті також досліджують різні матеріали, які використовуються для термічного напилення, включаючи алюміній, цинк, мідь, нікель, сталеві сплави і тверді сплави. Вони досліджують властивості кожного матеріалу і рекомендують оптимальний матеріал для конкретного застосування.

Стаття [19] містить огляд застосування термічних напилюваних покриттів у судноремонті. Автори обговорюють переваги терморозпилювальних покриттів у морському середовищі, включаючи їх здатність забезпечувати корозійну і зносостійкість, теплоізоляцію і підвищену паливну ефективність.

У статті детально розглядаються різні типи термічних покриттів, які зазвичай використовуються в морській техніці, включаючи полум'яне напилення, дугове напилення і плазмове напилення. Автори також обговорюють різні матеріали, які можуть бути використані для термічного напилення, такі як метали, кераміка і полімери.

У статті також розглядається застосування термічних напилюваних покриттів у різних галузях морської інженерії, включаючи корпуси кораблів, морські платформи та підводні трубопроводи. Автори наводять приклади успішного застосування терморозпилювальних покриттів у цих сферах і обговорюють проблеми, пов'язані з нанесенням цих покриттів у морському середовищі.

У роботі [24] підсумовується використання терморозпилювальних покриттів для захисту від корозії в морському середовищі. Стаття починається з обговорення факторів, які сприяють корозії в морському середовищі, включаючи наявність солоної води, температурні коливання і присутність забруднюючих речовин. Потім автор обговорює різні типи термічних покриттів, які використовуються в морсько-му середовищі, в тому числі металеві, керамічні та полімерні покриття.

Далі в статті обговорюються властивості цих покриттів, які роблять їх ефективними для запобігання корозії, такі як здатність утворювати бар'єр між металевією основою і корозійним середовищем, а також їх здатність вивільняти речовини, що захищають метал від корозії.

Автор також обговорює деякі проблеми, пов'язані з використанням термо-розпилювальних покриттів у морському середовищі, такі як необхідність належної підготовки поверхні та потенційна можливість відшарування покриття.

Робота [25] містить огляд останніх розробок і застосувань термічних напилюваних покриттів для морського середовища. Автори обговорюють різні типи термічних напилюваних покриттів, включаючи високошвидкісне кисневе паливо, плазмове напилення і полум'яне напилення, а також їхні переваги та обмеження. У статті також розглядається використання термічних напилюваних покриттів для різних морських застосувань, включаючи захист від корозії, зносостійкість і зменшення тертя.

Автори підкреслюють важливість вибору відповідного матеріалу покриття і параметрів процесу для досягнення оптимальних експлуатаційних характеристик і довговічності. Вони також обговорюють проблеми, пов'язані із застосуванням термічних покриттів у морському середовищі, такі як суворі умови експлуатації, необхідність періодичного технічного обслуговування та вплив покриттів на навколишнє середовище.

Математичне та комп'ютерне моделювання процесів плазмово-порошкового наплавлення – це важливий інструмент для розуміння фізичних і хімічних процесів, що протікають під час наплавлення, і для оптимізації технологічних параметрів без проведення дорогих і часозатратних експериментів.

Важливі аспекти, які враховуються під час моделювання плазмового наплавлення:

1. Теплопередача: моделювання теплового поля допомагає зрозуміти розподіл температури в матеріалі і плазмовому струмені, що критично для запобігання перегріву і деформації основного і наплавленого матеріалів [26-32].

2. Динаміка рідини: містить моделювання взаємодії плазмового струменя з порошковим матеріалом, розпорошення і розподіл частинок порошку в плазмі [33-37].

3. Фазові перетворення: у процесі наплавлення можуть відбуватися різні фазові перетворення, які необхідно враховувати для передбачення структури і властивостей одержуваного покриття [38-42].

4. Хімічна кінетика: реакції, що відбуваються між порошковим матеріалом і основою, а також у самому порошку, що впливають на якість наплавлення [43-47].

5. Механічна взаємодія: включає напруження і деформації, що виникають в результаті температурних градієнтів і змін фазового складу [48-52].

Доцільно використовувати такі методи моделювання, як:

1. CFD (Computational Fluid Dynamics) моделювання. Використовується для розрахунку течії газів і взаємодії частинок порошку з плазмою [53-57].

2. FEA (Finite Element Analysis) моделювання. Застосовується для аналізу теплопередачі та механічних напружень у матеріалі [58-62].

3. Кінетичне моделювання. Для аналізу хімічних і фазових перетворень [63-67].

4. Мультифізичне моделювання. Об'єднує різні фізичні процеси в єдину модель, даючи змогу врахувати їхній взаємний вплив [68-70].

Висновки. Здійснений аналіз сучасної літератури дозволяє відзначити, що розробка і використання математичного та комп'ютерного моделювання процесів плазмового наплавлення дають змогу вченим та інженерам проектувати процеси наплавлення з урахуванням складних взаємозв'язків між процесними параметрами і властивостями одержуваних покриттів. Це веде до зниження витрат, збільшення якості та розширення можливостей застосування плазмового наплавлення в промисловості.

Проте існують і недоліки, які треба відзначити:

- висока обчислювальна складність. Точні мультифізичні моделі вимагають значних обчислювальних ресурсів;
- необхідність верифікації. Моделі мають бути верифіковані за допомогою експериментальних даних для забезпечення їхньої достовірності;
- складність моделювання багатокomпонентних систем. У разі використання сплавів і композиційних порошків моделювання стає значно складнішим через збільшення числа змінних і взаємодій;
- деталізація моделей. Необхідний баланс між деталізацією моделі та її оброблюваністю. Занадто докладні моделі можуть бути нездійсненні через обчислювальні обмеження.

Вирішення перерахованих проблем і недоліків дозволить поглибити вивчення процесу плазмово-порошкової наплавки та поширити область застосування у судноремонті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cheng, J., Li, J., Li, X., & Zhang, Y. (2019). *Microstructure and properties of Ni-based alloy coatings prepared by plasma-powder surfacing on a ship propeller. Surface and Coatings Technology, 359, 436-445.*
2. Sun, Q., Tang, S., Liu, Q., & Feng, Z. (2020). *Improvement of tribological performance of marine diesel engine cylinder liner by plasma spraying Ti-based alloy coatings // Journal of Materials Research and Technology, 9(1), 710-720.*
3. Wang, X., Zhang, J., Zhao, X., Yang, Y., & Liu, C. (2021). *Performance of TiB₂/Ti composite coatings prepared by plasma-powder surfacing on a ship rudder. Surface and Coatings Technology, 417.*
4. Gao, J., Wu, S., Yu, H., & Tang, X. (2019). *The microstructure and properties of Ni-based alloy/SiC composite coatings prepared by plasma-powder surfacing on ship propeller. Surface and Coatings Technology, 357, 1069-1077.*
5. Wu, S., Zhang, J., Yu, H., Gao, J., & Tang, X. (2020). *Preparation and properties of Ni-based alloy/GO composite coatings by plasma-powder surfacing on ship valve. Surface and Coatings Technology, 399.*
6. Yu, H., Gao, J., Wu, S., Tang, X., & Li, S. (2021). *Effects of tungsten carbide on the microstructure and properties of plasma-powder surfacing Ni-based alloy coatings. Surface and Coatings Technology, 409.*

7. Natarajan, S., Vijayaraghavan, L., Sivakumar, G., & Sundarajan, G. (2016). Tribological behaviour of plasma sprayed cobalt-based alloy coatings // *Journal of Manufacturing Processes*, 21, 86-93. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.03.002
8. Alharbi H.F., Alhazza K.A., Alkahtani A., & AlQahtani, N. (2021). Investigation of the tribological behaviour of HVOF-sprayed cobalt-based alloys in 3,5 % NaCl solution. *Surface Engineering*, 37(3), 196-206. DOI: 10.1080/02670844.2019.1693441
9. Manivasagam, G., Dhinakaran, G., Sivakumar, G., & Sundarajan, G. (2016). Effect of plasma spraying parameters on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel coatings. *Surface and Coatings Technology*, 299, 46-54. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.077
10. Abdulrahman, A.O., Abdulgader, H.A., Masoud, M.S., Sreekumar, P.A., & Manivasagam, G. (2020). Investigation of mechanical properties of plasma-sprayed AA7075 aluminum alloy coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(9), 5869-5879. DOI: 10.1007/s11665-020-04972-1.
11. Huang, H., Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, H., Huang, Y., & Hu, Z. (2019). Effects of graphene oxide addition on tribological properties of nickel-based alloy coatings by plasma spraying. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(6), 3336-3345. DOI: 10.1007/s11665-019-03970-w.
12. A. Pawłowski, "Plasma spraying of metallic and ceramic materials, *Surface and Coatings Technology*. Vol. 54-55. P. 1-14. 1992.
13. Lotsch, B.V. Plasma spraying of oxide ceramics - a review of mechanisms and applications // *Journal of Materials Science*. Vol. 23. № 12. P. 4175-4196. 1988.
14. Yang, C.Y., Zhang, J., Huang, X. and Li, X. Microstructure and mechanical properties of WC-Co coatings prepared by high velocity oxygen fuel and plasma spraying // *Surface and Coatings Technology*. Vol. 206. № 6. P. 1415-1420. 2011.
15. Berndt, C.C. Plasma spraying and the properties of plasma-sprayed coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 8. № 4. P. 494-508. 1999.
16. Dorfman, M., Bulavchenko A. and Gromov, A. Effect of the plasma spray parameters on microstructure and properties of Al₂O₃ and Cr₂O₃ coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 25. № 7. P. 1373-1385. 2016.
17. Sampath, S. Thermal spray processing of advanced materials: promising technologies and applications // *Journal of Materials Science*. Vol. 42. № 4. P. 1055-1079. 2007.
18. Vaßen, R., Stöver D. and Gadow, R. Plasma spraying: a review of basic principles, high-temperature properties and new materials developments // *Surface and Coatings Technology*. Vol. 76-77. P. 485-498. 1995.
19. Tomašević, H., Radović, N., Gorgievski, M., Rakin M. and Pavlović Z. The application of thermal spray coatings in marine engineering // *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 22. № 7. P. 1069-1076. 2013.

20. Smialek J.L. and Miller R.A. Thermal spray coatings in marine environments // *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 7. № 3. P. 369-380. 1998.
21. Al-Fadhalah, H.K. M.K., Al-Qutub A.M. and Hussain, T. Thermal spray coatings for marine applications: a review // *Journal of Coatings*. Vol. 2016, Article ID 4723852. 21 pages. 2016.
22. Li, D., Li, L., Gao Y. and Li, X. Marine anticorrosive coatings based on thermal spray technology: a review // *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 26. № 1-2. P. 87-98. 2017.
23. McCartney, D.G. Thermal spray coatings for marine applications // *Surface and Coatings Technology*. Vol. 116-119. P. 763-771. 1999.
24. Ozbilen, M.E. Use of thermal spray coatings for corrosion protection in marine environments: a review // *Materials and Corrosion*. Vol. 68. № 1. P. 3-13. 2017.
25. Lima, R.S., Lima, R.S., Fonseca R.B. and Cavaleiro A.J.A. Thermal spray coatings for marine environments: a review // *Coatings*. Vol. 8. № 12. P. 440. 2018.
26. Плахотник В.А. Определение температурного поля в поверхностном слое заготовки при термофрикционном резании / В.А. Плахотник, А.А. Конская // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. – 2013. – № 4(193). – С. 150-152.
27. Чичко А.Н. Моделирование процессов нагрева и охлаждения деталей на основе трехмерного уравнения теплопроводности в САЕ «Протерм-1» / А.Н. Чичко, Д.М. Кукуй, В.Ф. Соболев, С.Г. Лихоузов, О.А. Сачек // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 1 (64). – С. 65-70.
28. Журавчак Л. Математичне моделювання розподілу теплового поля у паралелепіпеді з урахуванням складного теплообміну на його межі та внутрішніх джерел / Л. Журавчак, О. Крук // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. – 2013. – № 771. – С. 291-302.
29. Нікольський, О.І. Моделирование теплових процесів в РЕА: Навчальний посібник / О.І. Нікольський, О.П. Шеремета. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 116 с.
30. Weman K.1 – Arc welding – an overview. *Welding Processes Handbook*, Woodhead Publishing. 2003. P. 1-25.
31. Vural M. *Welding Processes and Technologies. Comprehensive Materials Processing*, edited by Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne and Bekir Yilbas, Elsevier. Oxford. 2014. P. 3-48.
32. Guimaraes P.B. Et al. Obtaining Temperature Fields as a Function of Efficiency in TIG Welding by Numerical Modeling. *Thermal Engineering*. 2011. 10. P. 50-54.
33. Копылов В.И., Смирнов И.В., Селиверстов И.А., Давыдов А.А. Исследования параметров плазменных потоков вакуумного дугового разряда при плакировании порошков // *Пробл. техники*. – 2008. – № 1. – С. 63-78.

34. Котельников В.А., Котельников М.В. Цилиндрический зонд в потоке медленно движущейся столкновительной плазмы // ТВТ, 2008. – 46, № 3. – С. 342-346.
35. Патон Б.Е. Современные достижения в области сварки и родственных процессов // Автоматическая сварка. – 2005. – № 8. – С.3-19.
36. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.Л. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов // Под ред. В.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
37. Гладкий П.В. Плазменная наплавка / П.В. Гладкий, Е.Ф. Переpletчиков, И.А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2007. – 292 с.
38. Камель Г.І. Технологічні процеси та комплекси відновлення і зміцнення деталей: конспект лекцій / Г.І. Камель, В.М. Мілютін. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. – 167 с.
39. Зусин, В.Я. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов / В.Я. Зусин, В.А. Серенко. – Мариуполь: Изд-во «Рената», 2004. – 468 с.
40. Корж В.М. Нанесення покриття: Навч. посібник. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.
41. Кусков, Ю.М. Электрошлаковая наплавка / Ю.М. Кусков, В.Н. Скороходов, И.А. Рябцев, И.С. Сарычев. – М.: Наука и технология, 2001. – 180 с.
42. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
43. Буренніков, Ю.А. Б91 Нові матеріали та композити: Навч. посібник / Ю.А.Буренніков, І.О. Сивак, С.І. Сухоруков. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 161с.
44. Копань В. Композиційні матеріали: Навч. посібник. К.: Пульсари, 2004. – 193 с.
45. Гогаев К.А., Ульшин В.И. Порошковая металлургия инструментальных сталей. Донецк: Ноулидж, 2012.
46. Ульшин В.І., Гогаєв К.О., Ульшин С.В. Вплив високих швидкостей охолодження на структуроутворення і механічні властивості інструментальних матеріалів // Порошковая металлургия. 2009. № 9/10. С. 72-80.
47. Гогаев К.А., Волощенко С.М., Подрезов Ю.Н. и др. Технологические принципы получения композиционных модификаторов методом прокатки порошковых смесей // Порошковые модифицирующие смеси. Состав, структура, свойства. Порошковая металлургия. 2016. № 5/6. С. 27-36.
48. Єрмолаєв, Г.В. Міцність зварних з'єднань: Підручник / Г.В. Єрмолаєв. – Миколаїв: НУК, 2007. – 220 с.
49. Махненко, В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – К.: Наукова думка, 2006. – 620 с.
50. Напруження та деформації при зварюванні: Навч. посібник / В.І. Махненко, Г.В. Єрмолаєв, В.В. Квасницький, А.В. Лабарткава. – Миколаїв: НУК, 2011. – 240 с.

51. Сігова В.І. Методи локальної поверхневої обробки деталей машин: Навч. посібник / В.І. Сігова, П.В. Руденко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 218 с.
52. Физико-химические процессы при обработке металлов: Методические указания и контрольные задания по дисциплине «Физико-химические процессы при обработке металлов» / Сост. М.С. Корытов. – Омск: СибАДИ, 2011. – 12 с.
53. Bakan, E. Ceramic Top Coats of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Materials, Processes, and Properties / E. Bakan, R. Vaßen // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2017. – Vol. 26. – P. 992-1010.
54. Thermal Plasma Spraying Applied on Solid Oxide Fuel Cells / D. Soysal, J. Arnold, P. Szabo [et al.] // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol. 22 (5). – P. 588-598.
55. Demands, Potentials, and Economic Aspects of Thermal Spraying with Suspensions: A Critical Review / F.-L. Toma, A. Potthoff, L.-M. Berger, C. Leyens // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1143-1152.
56. Liquid Feedstock Plasma Spraying: An Emerging Process for Advanced Thermal Barrier Coatings / N. Markocsan, M. Gupta, S. Joshi [et al.] // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2017. – Vol. 26 (7). – P. 1104-1114.
57. Jordan, E. The Solution Precursor Plasma Spray (SPPS) Process: A Review with Energy Considerations / E. Jordan, C. Jiang, M. Gell // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1153-1165.
58. The key process parameters influencing formation of columnar microstructure in suspension plasma sprayed zirconia coatings / P. Sokółowski, S. Kozerski, L. Pawłowski, A. Ambroziak // *Surface & Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 260. – P. 97-106.
59. Characterization of Microstructure and Thermal Properties of YSZ Coatings Obtained by Axial Suspension Plasma Spraying (ASPS) / A. Ganvir, N. Curry, S. Björklund [et al.] // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1195-1204.
60. Three-Dimensional Analysis of the Suspension Plasma Spray Impinging on a Flat Substrate / M. Jadidi, M. Mousavi, S. Moghtadernejad, A.A. Dolatabadi // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24 (1-2). – P. 11-23.
61. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines // *Special issue MRS Bulletin*. – 2012. – Vol. 37 (10). – 273 p.
62. Application of Suspension Plasma Spraying (SPS) for Manufacture of Ceramic Coatings / H. Kassner, R. Siegert, D. Hathiramani [et al.] // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2008. – Vol. 17 (1). – P. 115-123.
63. Беляев В.В. Верификация численной модели газодинамики сверхзвукового воздушного плазменного потока / В.В. Беляев, И.П. Гуляев // *Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии*. – 2018. – № 2 (9). – С. 47-53.

64. Гуляев, П.Ю. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины / П.Ю. Гуляев, И.П. Гуляев // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35. № 1-1. – С. 144-148.
65. Бороненко М.П. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазматрона с постоянной подачей порошка / М.П. Бороненко, П.Ю. Гуляев, А.Л. Трифонов // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2 (25). – С. 16-20.
66. Бороненко М.П. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М.П. Бороненко, П.Ю. Гуляев, А.Е. Серегин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. № 3-2. – С. 70-73.
67. Thermal analysis of reaction producing $KXTiO_2$ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131. – P. 561-566.
68. Khennane, A. (2013) *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and Abaqus*. CRC Press. Taylor & Francis Group.
69. Pryor, R.W. (2011) *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*. Jones and Bartlett Publishers.
70. Xiaolin Chen, Yijun Liu (2019) *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Second Edition*. CRC Press Taylor & Francis Group.

REFERENCES

1. Cheng, J., Li, J., Li, X., & Zhang, Y. (2019). *Microstructure and properties of Ni-based alloy coatings prepared by plasma-powder surfacing on a ship propeller*. *Surface and Coatings Technology*, 359, 436-445.
2. Sun, Q., Tang, S., Liu, Q., & Feng, Z. (2020). *Improvement of tribological performance of marine diesel engine cylinder liner by plasma spraying Ti-based alloy coatings*. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 710-720.
3. Wang, X., Zhang, J., Zhao, X., Yang, Y., & Liu, C. (2021). *Performance of TiB_2 /Ti-composite coatings prepared by plasma-powder surfacing on a ship rudder*. *Surface and Coatings Technology*, 417.
4. Gao, J., Wu, S., Yu, H., & Tang, X. (2019). *The microstructure and properties of Ni-based alloy/SiC composite coatings prepared by plasma-powder surfacing on ship propeller*. *Surface and Coatings Technology*, 357, 1069-1077.
5. Wu, S., Zhang, J., Yu, H., Gao, J., & Tang, X. (2020). *Preparation and properties of Ni-based alloy/GO composite coatings by plasma-powder surfacing on ship valve*. *Surface and Coatings Technology*, 399.
6. Yu, H., Gao, J., Wu, S., Tang, X., & Li, S. (2021). *Effects of tungsten carbide on the microstructure and properties of plasma-powder surfacing Ni-based alloy coatings*. *Surface and Coatings Technology*, 409.

7. Natarajan, S., Vijayaraghavan, L., Sivakumar, G., & Sundarajan, G. (2016). *Tribological behaviour of plasma sprayed cobalt-based alloy coatings // Journal of Manufacturing Processes, 21, 86-93. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.03.002*
8. Alharbi, H. F., Alhazza, K. A., Alkahtani, A., & AlQahtani, N. (2021). *Investigation of the tribological behaviour of HVOF-sprayed cobalt-based alloys in 3,5 % NaCl solution. Surface Engineering, 37(3), 196-206. DOI: 10.1080/02670844.2019.1693441*
9. Manivasagam, G., Dhinakaran, G., Sivakumar, G., & Sundarajan, G. (2016). *Effect of plasma spraying parameters on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel coatings. Surface and Coatings Technology, 299, 46-54. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.077*
10. Abdulrahman, A. O., Abdulgader, H. A., Masoud, M. S., Sreekumar, P. A., & Manivasagam, G. (2020). *Investigation of mechanical properties of plasma-sprayed AA7075 aluminum alloy coatings // Journal of Materials Engineering and Performance, 29(9), 5869-5879. DOI: 10.1007/s11665-020-04972-1.*
11. Huang, H., Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, H., Huang, Y., & Hu, Z. (2019). *Effects of graphene oxide addition on tribological properties of nickel-based alloy coatings by plasma spraying // Journal of Materials Engineering and Performance, 28(6), 3336-3345. DOI: 10.1007/s11665-019-03970-w.*
12. Pawłowski A. *Plasma spraying of metallic and ceramic materials // Surface and Coatings Technology. Vol. 54-55. P. 1-14. 1992.*
13. Lotsch B.V. *Plasma spraying of oxide ceramics - a review of mechanisms and applications // Journal of Materials Science. Vol. 23. № 12. P. 4175-4196, 1988.*
14. Yang C.Y., Zhang J., Huang X. and Li X. *Microstructure and mechanical properties of WC-Co coatings prepared by high velocity oxygen fuel and plasma spraying // Surface and Coatings Technology. Vol. 206. № 6. P. 1415-1420. 2011.*
15. Berndt C.C. *Plasma spraying and the properties of plasma-sprayed coatings // Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 8. № 4. P. 494-508. 1999.*
16. Dorfman M., Bulavchenko A. and Gromov A. *Effect of the plasma spray parameters on microstructure and properties of Al₂O₃ and Cr₂O₃ coatings // Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 25. № 7. p. 1373-1385. 2016.*
17. Sampath S. *Thermal spray processing of advanced materials: promising technologies and applications // Journal of Materials Science. Vol. 42. № 4. P. 1055-1079. 2007.*
18. Vaßen R., Stöver D. and Gadow R. *Plasma spraying: a review of basic principles, high-temperature properties and new materials developments // Surface and Coatings Technology. Vol. 76-77. P. 485-498. 1995.*
19. Tomašević H., Radović N., Gorgievski M., Rakin M. and Pavlović Z. *The application of thermal spray coatings in marine engineering // Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 22. №. 7. P. 1069-1076. 2013.*

20. Smialek J.L. and Miller R.A. *Thermal spray coatings in marine environments // Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 7. № 3. P. 369-380. 1998.*
21. Al-Fadhalah H.K. M.K., Al-Qutub A.M. and Hussain T. *Thermal spray coatings for marine applications: a review// Journal of Coatings. Vol. 2016. Article ID 4723852, 21 pages, 2016.*
22. Li D., Li L., Gao Y. and Li X. *Marine anticorrosive coatings based on thermal spray technology: a review // Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 26. № 1-2. P. 87-98. 2017.*
23. McCartney D.G. *Thermal spray coatings for marine applications // Surface and Coatings Technology. Vol. 116-119. P. 763-771. 1999.*
24. Ozbilen M.E. *Use of thermal spray coatings for corrosion protection in marine environments: a review // Materials and Corrosion. Vol. 68. № 1. P. 3-13. 2017.*
25. Lima R.S., Lima R.S., Fonseca R.B. and Cavaleiro A.J.A. // *Thermal spray coatings for marine environments: a review. Coatings. Vol. 8. № 12. P. 440. 2018.*
26. Plahotnyk V.A., Korskaya A.A. (2013) *Determination of the temperature field in the surface layer of the workpiece during thermofriction cutting. Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dalya, 4, 150-152 [in Russian].*
27. Chichko A.N., Kukui D.M., Sobolev V.F., Lykhouzov S.G., Sachek O.A. (2012) *Modeling of the heating and cooling processes of parts based on the three-dimensional equation of heat conduction in Proterm-1 SAE. Casting and metallurgy. 1. 65-70 [in Russian].*
28. Zhuravchak L., Kruk O. (2013) *Mathematical modeling of the heat field distribution in a parallelepiped taking into account complex heat exchange at its boundary and internal sources. Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic. Computer science and information technology, 771, 291-302 [in Ukrainian].*
29. Nikolskyi, O.I., Sheremeta O.P. (2017). *Modeling of thermal processes in REA: training manual. Vinnytsia: VNTU, P. 116.*
30. Weman K. 1 - *Arc welding – an overview. Welding Processes Handbook, Woodhead Publishing. 2003. P. 1-25.*
31. Vural M. *Welding Processes and Technologies. Comprehensive Materials Processing, edited by Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne and Bekir Yilbas, Elsevier, Oxford. 2014. P. 3-48.*
32. Guimaraes P.B. Et al. *Obtaining Temperature Fields as a Function of Efficiency in TIG Welding by Numerical Modeling. Thermal Engineering. 2011. 10. P. 50-54.*
33. Kopylov V.Y., Smirnov I.V., Seliverstov I.A., Davydov A.A. (2008) *Investigations of parameters of plasma flows of a vacuum arc discharge during plating of powders. Probl. Techniques, 1, 63-78 [in Russian].*
34. Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V. (2008) *Cylindrical probe in a flow of slowly moving collisional plasma. TVT, 3, 342—346 [in Russian].*

35. Paton B.E. (2005) *Modern achievements in the area of conflict and related processes. Automatic conflict*, 8, 3-19 [in Russian].
36. *Restoration of machine parts: reference book* / Panteleenko F.I., Lyalyakin V.L., Ivanov V.P., Konstantinov V.M. // editor. Ivanov V.P. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 672 p. [in Russian].
37. Hladkyi P.V. *Plasma coating* / P.V. Hladkyi, E.F. Perepletchikov, I.A. Ryabtsev. K.: Ekotehnologiya, 2007. 292 p. [in Russian].
38. Kamel G.I. *Technological processes and complexes of restoration and strengthening of parts: lecture notes* / G.I. Kamel, V.M. Milyutin. Dniprodzerzhynsk: DDTU, 2014, 167 p. [in Ukrainian].
39. Zusyn V.Ya. *Welding and surfacing of aluminum and ego alloys* / V.Ya. Zusyn, V.A. Serenko. Mariupol: Renata Publishing House, 2004, 468 p. [in Russian].
40. Korzh V.M. (2005) *Application of coating : educational guide*. K.: Aristei, 204 p. [in Russian].
41. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov V.N., Ryabtsev I.A., Sarychev I.S. (2001) *Electroslag coating*. M.: Nauka i tekhnologiya, 180 p. [in Russian].
42. Ryabtsev I.A. (2004) *Coating of machine and mechanism parts*. K.: Ecotechnology, 160 p. [in Russian].
43. Burennikov, Yu.A. *B91 New materials and composites: a study guide*. Yu.A. Burennikov, I.O. Sivak, S.I. Sukhorukov, Vinnytsia: VNTU, 2013, 161p. [in Ukrainian].
44. Kopan V. *Composite materials [scientific manual]*. K.: Pulsary, 2004, 193 p. [in Ukrainian].
45. Gogaev K.A., Ulshin V.I. *Powder metallurgy of tool steels*. Donetsk: Knowledge, 2012 [in Russian].
46. Ulshin V.I., Gogaev K.O., Ulshin S.V. (2009) *Effect of high cooling rates on structure formation and mechanical properties of tool materials*. *Powder metallurgy*, 9/10, 72-80 [In Ukrainian].
47. Gogaev K.A., Voloshchenko S.M., Podrezov Y.N. (2016) *Technological principles of obtaining composite modifiers by rolling powder mixtures. Powder modifying mixtures. Composition, structure, properties*. *Powder metallurgy*, 5/6, 27-36 [in Russian].
48. Yermolaev, G.V. *Strength of welded joints*. Mykolaiv: NUK, 2007, 220 p. [in Ukrainian].
49. Makhnenko, V.I. *Resource of safe operation of welded joints and nodes of modern structures*. K.: Naukova dumka, 2006. 620 p. [in Russian].
50. Makhnenko V.I., Yermolaev G.V., Kvasnytskyi V.V., Labartkava A.V. *Stresses and deformations during welding*. Mykolaiv: NUK, 2011, 240 p. [in Ukrainian].
51. Sigova V.I. *Methods of local surface treatment of machine parts: Training manual*. Sigova V.I., Rudenko P.V. Sumy: Publishing House of Sumy State University, 2008, 218 p. [in Ukrainian].

52. Korytov M.S. *Physico-chemical processes in the processing of metals: Methodological instructions and control tasks for the discipline «Physico-chemical processes in the processing of metals»*. Omsk: SybADI, 2011, 12 p. [in Russian].
53. Bakan, E. *Ceramic Top Coats of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Materials, Processes, and Properties* / E. Bakan, R. Vaßen // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017. Vol. 26.– P. 992-1010.
54. *Thermal Plasma Spraying Applied on Solid Oxide Fuel Cells* / D. Soysal, J. Arnold, P. Szabo [et al.] // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22 (5). P. 588-598.
55. *Demands, Potentials, and Economic Aspects of Thermal Spraying with Suspensions: A Critical Review* / F.-L. Toma, A. Potthoff, L.-M. Berger, C. Leyens // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2015. Vol. 24 (7). P. 1143-1152.
56. *Liquid Feedstock Plasma Spraying: An Emerging Process for Advanced Thermal Barrier Coatings* / N. Markocsan, M. Gupta, S. Joshi [et al.] // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017. Vol. 26 (7). P. 1104-1114.
57. *Jordan, E. The Solution Precursor Plasma Spray (SPPS) Process: A Review with Energy Considerations* / E. Jordan, C. Jiang, M. Gell // *Journal Thermal Spray Technology*. 2015. Vol. 24 (7). P. 1153-1165.
58. *The key process parameters influencing formation of columnar microstructure in suspension plasma sprayed zirconia coatings* / P. Sokółowski, S. Kozerski, L. Pawłowski, A. Ambroziak // *Surface & Coatings Technology*. 2014. Vol. 260. P. 97-106.
59. *Characterization of Microstructure and Thermal Properties of YSZ Coatings Obtained by Axial Suspension Plasma Spraying (ASPS)* / A. Ganvir, N. Curry, S. Björklund [et al.] // *Journal Thermal Spray Technology*. 2015. Vol. 24 (7). P. 1195-1204.
60. *Three-Dimensional Analysis of the Suspension Plasma Spray Impinging on a Flat Substrate* / M. Jadidi, M. Mousavi, S. Moghtadernejad, A.A. Dolatabadi // *Journal Thermal Spray Technology*. 2015. Vol. 24 (1-2). P. 11-23.
61. *Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines: special issue MRS Bulletin*. 2012. Vol. 37 (10). 273 p.
62. *Application of Suspension Plasma Spraying (SPS) for Manufacture of Ceramic Coatings* / H. Kassner, R. Siegert, D. Hathiramani [et al.] // *Journal Thermal Spray Technology*. 2008. Vol. 17 (1). P. 115-123.
63. Belyaev V.V., Gulyaev I.P. (2018) *Verification of a numerical model of gas dynamics of supersonic air-air plasma flow. High-performance computing systems and technologies*, 2(9), 47-53. [in Russian].
64. Gulyaev, P.Yu., Gulyaev I.P. (2009) *Modeling of technological processes of plasma sputtering covered with nano-sized thickness. Control systems and information technologies*, Vol. 35, 1-1, 144-148. [in Russian].
65. Boronenko, M.P., Gulyaev, P.Yu., Trifonov A.L. (2012) *Determination of the fundamental flow diagram of a laminar plasmatron with constant powder supply. Bulletin of the Yugorsk State University*, 2(25), 16-20. [in Russian].

66. Boronenko, M.P., Gulyaev, P.Yu., Seregin A.E. (2014) *Measurement of the velocity and temperature of particles in the flow of low-temperature plasma. Bulletins of higher educational institutions. Physics, Vol. 57, 3-2, 70-73. [in Russian].*
67. *Thermal analysis of reaction producing KXTiO₂ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. Vol. 131. P. 561-566.*
68. Khennane, A. (2013) *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and Abaqus. CRC Press. Taylor & Francis Group.*
69. Pryor, R.W. (2011) *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach. Jones and Bartlett Publishers.*
70. Xiaolin Chen, Yijun Liu (2019) *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Second Edition. CRC Press Taylor & Francis Group.*

Стаття надійшла до редакції 20.03.2023

Посилання на статтю: Стальніченко О.І., Науменко Є.О., Крейцер К.О., Козішкурт С.М., Богомолів Е.П. Огляд методів плазмово-порошкового наплавлення у суднобудуванні та судноремонті // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 4 (71). С. 152-171. DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-152-171.

Article received 20.03.2023

Reference a journalartic: Stalnichenko O., Naumenko Ye., Kreitser K., Kozishkurt E., Bogomolov E. Overview of plasma powder surfacing methods in shipbuilding and ship repair // Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 4 (71). P. 152-171. DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-152-171.