

УДК 621.791.7:621.791.927

DOI 10.47049/2226-1893-2026-1-95-107

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ
ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ
ПРИ ВІДНОВЛЕННІ СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ
ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

О.І. Стальніченко

к.т.н., професор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології матеріалів
tmkafedra@bigmir.net

Є.О. Науменко

к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства і технології матеріалів
naumenko.e.o@op.edu.ua

Є.М. Козішкурт

док.філ.(PhD), ст. викладач кафедри матеріалознавства і технології матеріалів
koziskurtevgen@gmail.com

Е.П. Богомолів

ст. викладач кафедри матеріалознавства і технології матеріалів
boginerged@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У статті представлено комплексний підхід до дослідження процесу плазово-порошкового наплавлення (ППН), спрямованого на відновлення поверхонь суднових валів, що зазнають інтенсивного зношування в умовах експлуатації.

Запропоновано поєднання регресійно-кореляційної математичної моделі, отриманої за результатами попередніх робіт авторів, та тривимірного комп'ютерного моделювання теплових і механічних процесів, що супроводжують наплавлення.

У роботі розглянуто вплив основних технологічних параметрів – сили струму, напруги дуги, швидкості наплавлення та кута нахилу плазмотрона – на формування температурного поля, залишкових напружень і межувитривалості наплавленого шару. Для чисельного аналізу створено 3D-модель фрагмента суднового вала діаметром 200 мм та довжиною 150 мм із наплавленим шаром шириною 10 мм та висотою 3,5 мм.

Теплові процеси моделювалися з використанням рухомого концентрованого джерела тепла, що відтворює реальні умови ППН. На основі методу скінченних елементів визначено просторові температурні розподіли та напружено-деформований стан у зоні наплавлення. Отримані результати дали змогу простежити зміни T_{max} і σ_{max} залежно від параметрів процесу та встановити тенденції, що визначають якість відновленого шару.

© Стальніченко О.І., Науменко Є.О., Козішкурт Є.М., Богомолів Е.П., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Запропонована інтегрована модель дозволяє не лише оцінити поведінку металу в процесі наплавлення, але й оптимізувати режими ППН за критеріями мінімізації залишкових напружень і підвищення межі витривалості. Установлено оптимальний інтервал технологічних параметрів, що забезпечує найбільш сприятливий термонапружений стан поверхні. Результати дослідження можуть бути використані при розробці технологічних карт відновлення суднових валів та інших відповідальних деталей суднових машин і механізмів.

Ключові слова: *плазмово-порошкове наплавлення, комп'ютерне моделювання, температура, залишкові напруження, межа витривалості, математична модель, оптимізація параметрів, судновий вал, метод скінченних елементів.*

UDC 621.791.7:621.791.927

DOI 10.47049/2226-1893-2026-1-95-107

OPTIMIZATION OF PLASMA–POWDER SURFACING PARAMETERS FOR THE RESTORATION OF MARINE PROPELLER SHAFTS USING COMPUTER MODELING

O. Stalnichenko

PhD, Professor,

Head of the Department materials Science and Technology

tmkafedra@bigmir.net

Ye. Naumenko

PhD., associate professor of the Department materials Science and Technology

naumenko.e.o@op.edu.ua

Ye. Kozishkurt

PhD, Senior lecturer of the Department materials Science and Technology

igonua@gmail.com

E. Bogomolov

Senior lecturer of the Department materials Science and Technology

boginerged@gmail.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The article presents a comprehensive approach to studying the plasma-powder surfacing (PPS) process aimed at restoring the surfaces of marine shafts that experience intensive wear under operating conditions. The proposed method combines a regression–correlation mathematical model developed in the authors' previous works with three-dimensional computational modeling of the thermal and mechanical processes accompanying the surfacing operation. The study examines the influence of key technological parameters – welding current, arc voltage, surfacing speed, and plasma torch inclination angle – on the formation of temperature fields, residual stresses, and the fatigue endurance of the deposited layer.*

For numerical analysis, a 3D model of a fragment of a marine shaft with a diameter of 200 mm and a length of 150 mm was constructed, including a deposited layer 10 mm wide and 3,5 mm high. Thermal processes were simulated using a moving

concentrated heat source that reproduces real PPS operating conditions. Based on the finite element method, spatial temperature distributions and the stress-strain state in the surfacing zone were determined. The obtained results made it possible to trace the changes in T_{max} and σ_{max} depending on the process parameters and to identify trends that govern the quality of the restored layer.

The proposed integrated model enables not only the evaluation of metal behavior during surfacing but also the optimization of PPS parameters according to criteria of minimizing residual stresses and increasing fatigue endurance. An optimal range of technological parameters has been established, ensuring the most favorable thermomechanical state of the surface. The results of the study can be applied in developing technological guidelines for the restoration of marine shafts and other critical components of ship machinery and mechanisms.

Keywords: *plasma-powder surfacing, computer modeling, temperature, residual stresses, fatigue endurance, mathematical model, parameter optimization, marine shaft, finite element method.*

Вступ. Суднові вали є одними з найбільш відповідальних елементів енергетичних установок та рушійних комплексів суден, оскільки вони передають крутний момент від головного двигуна до гребного гвинта й працюють у складних умовах комбінованого впливу змінних механічних навантажень, вібрацій, корозійного й абразивного зношування. Вихід з ладу валопроводу призводить не лише до значних фінансових витрат на ремонт, але й до простою суден, що особливо критично для комерційного флоту. Одним з ефективних підходів до продовження ресурсу таких деталей є відновлення зношених поверхонь за допомогою наплавлення зносостійких сплавів замість повної заміни вала.

Серед різноманітних методів відновлення поверхонь саме плазмово-порошкове наплавлення (ППН) посідає важливе місце завдяки поєднанню високої енергонасиченості плазмової дуги та можливості керованого введення порошкового матеріалу у зону плавлення. Це дає змогу формувати покриття з підвищеною зносостійкістю та корозійною стійкістю, а також контролювати геометрію наплавленого шару й глибину проплавлення основного металу. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється чисельному аналізу теплових полів і залишкових напружень при плазмовому наплавленні.

Розвиток методів скінченно-елементного моделювання (СЕМ) дозволив суттєво поглибити уявлення про формування температурних полів, залишкових напружень і деформацій при плазмовому та електродуговому зварюванні й наплавленні. У низці робіт побудовано тривимірні моделі процесів плазмової дуги, які враховують розподіл теплового потоку, конвективний теплообмін, зміну теплофізичних властивостей матеріалу з температурою та наступний розрахунок напружено-деформованого стану. Так, у дослідженні [2] показано можливість коректного передбачення залишкових напружень та кутових деформацій при плазмовій обробці тонколистового титанового сплаву Ti64 (Ti-6Al-4V). Подібні підходи застосовано і для аналізу мікроструктурних змін та варіацій твердості в зоні термічного впливу й металу шва при плазмовому зварюванні нержавіючих сталей [3].

Паралельно розвивається напрям оптимізації технологічних параметрів плазмових процесів. У роботі [4] для плазмового поверхневого гартування використано поєднання алгоритмів і штучних нейронних мереж, що дозволило визначити поєднання режимів, які забезпечують потрібний рівень твердості й глибини зміцненого шару без надмірних термічних деформацій.

Окремі дослідження присвячено вивченню зносостійкості наплавлених шарів на гребних валах, де показано, що правильно підібраний склад наплавленого матеріалу й режим наплавлення істотно впливають на абразивне зношування та ресурс відновлених деталей [5]. Разом із тим, більшість таких робіт виконано на відносно простих зразках (пластини, кільцеві зразки) або зосереджено на окремих аспектах (мікроструктура, твердість, локальні напруження), без комплексного поєднання регресійних моделей, СЕМ-аналізу й задачі оптимізації для реальних геометрій суднових валів.

У попередній роботі авторів [1] на основі результатів повнофакторного експерименту було побудовано регресійну математичну модель, яка описує вплив сили струму, напруги, швидкості наплавлення та кута нахилу плазмотрона на межу витривалості наплавленого шару при плазмово-порошковому наплавленні. Ця модель дала змогу встановити узагальнений характер впливу технологічних факторів і виділити діапазони параметрів, у яких досягається підвищення втомної довговічності. Однак у зазначеній роботі не розглядалися просторові температурні поля та залишкові напруження у масиві суднового вала, а також не проводився тривимірний аналіз термонапруженого стану із урахуванням реальної геометрії деталі.

Зважаючи на це, актуальним є поєднання регресійної математичної моделі з тривимірним комп'ютерним моделюванням процесу наплавлення суднового вала як циліндричної деталі великого діаметра. Такий підхід дозволяє не лише оцінювати зміну межі витривалості за результатами експериментального планування, але й досліджувати розподіл температури та залишкових напружень у зоні наплавлення і в приповерхневих шарах вала. Крім того, інтеграція результатів СЕМ-розрахунків із регресійною моделлю відкриває можливості для побудови критеріальних функцій, що одночасно враховують втомну міцність і рівень термічних напружень, та подальшої оптимізації параметрів ППН.

Мета статті – розроблення та обґрунтування комплексної моделі процесу плазмово-порошкового наплавлення (ППН) суднових валів, яка поєднує експериментально отриману регресійно-кореляційну залежність для межі витривалості з тривимірним комп'ютерним моделюванням теплових і термонапружених процесів у відновлюваній зоні.

На відміну від існуючих робіт, які переважно розглядають окремо або емпіричні моделі, або СЕМ-аналіз процесів наплавлення, у даній роботі ставиться завдання створити інтегровану наукову основу для кількісного оцінювання впливу технологічних параметрів ППН на властивості відновленого шару в умовах реальної геометрії суднових валів великого діаметра.

Виклад основного матеріалу. Математичне моделювання впливу технологічних параметрів плазмово-порошкового наплавлення (ППН) ґрунтується на результатах попередніх експериментальних досліджень авторів, виконаних із використанням повнофакторного планування та статистичного аналізу. На основі отриманих даних було побудовано регресійну модель, що характеризує залежність межі витривалості наплавленого шару від чотирьох основних технологічних факторів: сили струму дуги X_1 , напруги дуги X_2 , швидкості наплавлення X_3 та кута нахилу плазмотрона X_4 . Узагальнена форма рівняння має вигляд:

$$\sigma_{-1} = 253,7322 + 0,1292X_1 + 0,4464X_2 - 0,1494X_3 - 3,4625X_4 \quad (1)$$

Дане рівняння описує функціональну залежність межі витривалості від технологічних умов наплавлення та дозволяє інтерпретувати вплив кожного фактора окремо. Додатні коефіцієнти при змінних X_1 та X_2 свідчать про те, що збільшення сили струму та напруги дуги сприяє зростанню межі витривалості. Це можна пояснити формуванням стабільнішої зони плавлення, кращою якістю металургійного з'єднання та одноріднішим проплавленням порошкового матеріалу. Негативні коефіцієнти при X_3 та X_4 вказують на підвищення ризику формування дефектів, таких як непровари, порушення геометрії валика та локальні концентрації залишкових напружень.

Формально рівняння є лінійною моделлю першого порядку, однак воно інтегрує комплексний вплив явищ, що відбуваються під час ППН: теплової дії плазмової дуги, плавлення, конвекції та тепловідведення у масиві вала. Кожний коефіцієнт моделі фактично відображає середню чутливість межі витривалості до зміни відповідного технологічного параметра в реальному діапазоні його варіювання. Таким чином, регресійна залежність виконує роль компактної фізично-обумовленої апроксимації складного тепломеханічного процесу.

Однак однієї математичної моделі недостатньо для повної оцінки процесу, оскільки вона не відображає просторових температурних градієнтів і залишкових напружень, що формуються у відновленій зоні. Саме ці фактори визначають фактичну надійність та ресурс суднового вала після наплавлення. Тому у даній роботі регресійну модель синтезовано з чисельним моделюванням, яке забезпечує просторову деталізацію параметрів процесу.

Для інтеграції двох підходів застосовано наступну логіку:

1. Регресійна модель використовується для кількісної оцінки впливу технологічних чинників на властивості наплавленого шару та для визначення загальних тенденцій зміни межі витривалості.

2. Чисельна модель забезпечує обчислення температурних полів, градієнтів охолодження та розподілу залишкових напружень у тривимірному просторі з урахуванням реальної геометрії суднового вала.

3. Поєднання моделей дозволяє оцінити механічні властивості шару не лише за експериментальною статистикою, але й за фізичними характеристиками, отриманими зі СЕМ-аналізу.

4. Синтез моделей відкриває можливість формувати критерій оптимізації, що одночасно враховує межу витривалості та рівень залишкових напружень.

У контексті ППН математична модель виконує важливу роль першого етапу оптимізації – вона дозволяє визначити критичні параметри, на які слід спрямувати чисельний аналіз. Зокрема, сила струму та напруга є домінуючими факторами, що контролюють тепловкладення, а кут нахилу плазмотрона та швидкість наплавлення – параметрами, що впливають на форму валика та рівномірність теплового розподілу.

Наведена регресійна математична модель дозволяє кількісно оцінити вплив основних технологічних параметрів плазово-порошкового наплавлення на межу витривалості наплавленого шару та визначити загальні тенденції зміни механічних властивостей залежно від режимів ППН. Проте її можливості є обмеженими у контексті просторового аналізу теплових процесів і формування залишкових напружень у тілі суднового вала. Модель описує глобальний вплив факторів, але не враховує локальні температурні градієнти, неоднорідність охолодження, геометричні особливості деталі та розвиток термонапруженого стану у приповерхневих шарах.

Саме тому подальше дослідження вимагає переходу від суто статистичного опису до просторово-часової фізичної моделі процесу наплавлення. Для цього необхідно побудувати тривимірну геометричну модель фрагмента суднового вала, яка дасть змогу відтворити реальні умови ППН, врахувати особливості наплавленого шару та забезпечити коректне застосування методу скінченних елементів для моделювання теплових і механічних полів.

Створення такої моделі є критично важливим етапом, оскільки саме 3D-підхід дозволяє відтворити характер розподілу температури, інтенсивність тепловідведення в масив вала, локальні концентрації напружень та взаємозв'язок між режимами наплавлення і структурно-напруженим станом матеріалу. У свою чергу, результати чисельного моделювання дають змогу доповнити та уточнити висновки, отримані на основі математичної моделі, і сформувати інтегрований підхід до оптимізації технології ППН.

З огляду на це, наступним кроком дослідження є побудова тривимірної моделі об'єкта наплавлення (рис. 1), яка стане основою для подальшого теплового та термопружного аналізу.

Для чисельного аналізу створено 3D модель суднового вала діаметром 200 мм та довжиною 150 мм із сталі 30XH2MA. На поверхні вала сформовано наплавлений шар шириною 10 мм та висотою 3,5 мм (рис. 2). Сітка згущена у зоні наплавлення для підвищення точності теплофізичних розрахунків.

Чисельне моделювання виконано у середовищі Python із застосуванням бібліотек FEniCS, NumPy, SciPy та Matplotlib. Розрахунки проводились у два послідовні етапи: нестационарний теплофізичний аналіз та оцінювання термопружного стану та залишкових напружень.

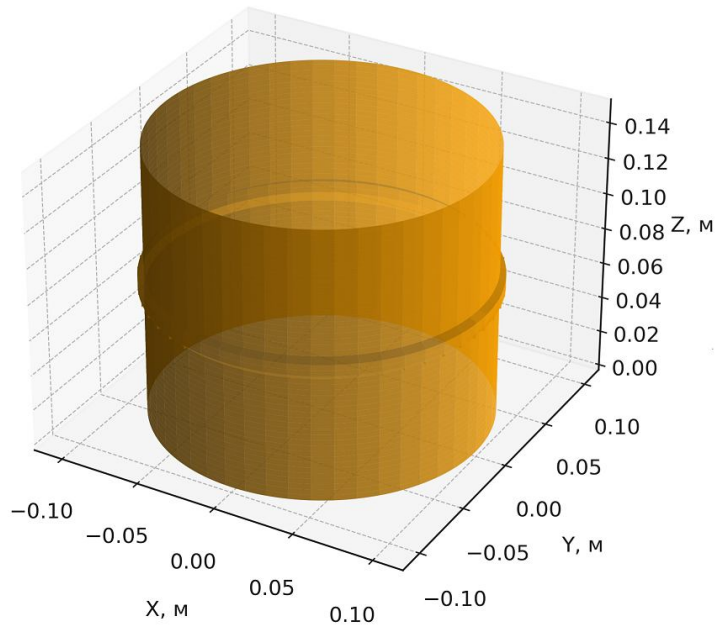


Рис. 1. Тривимірна модель об'єкта наплавлення

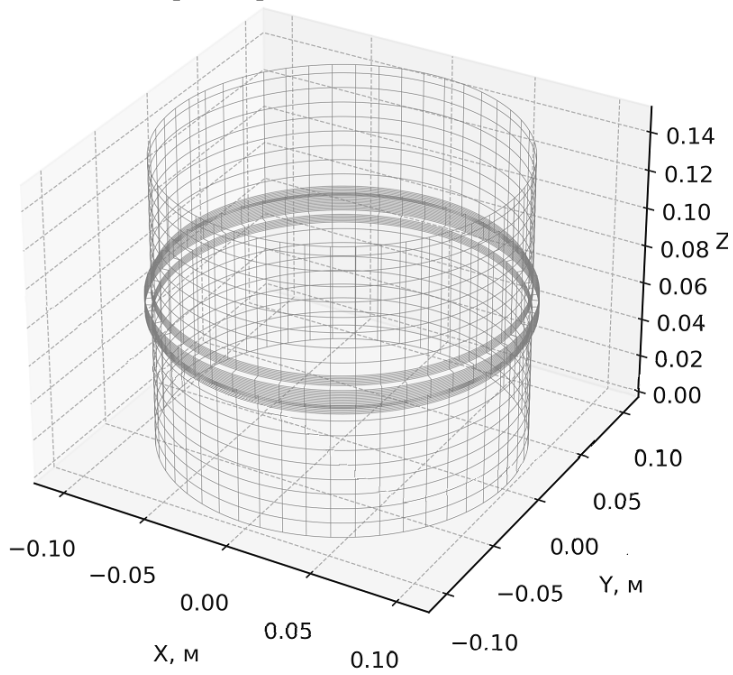


Рис. 2. Згушена FEM-сітка у зоні наплавлення

У першому етапі розв'язувалося нестационарне рівняння теплопровідності з урахуванням реальної геометрії об'єкта: суднового вала діаметром 200 мм і довжиною 150 мм зі сталі 30ХН2МА. На зовнішній поверхні було змодельовано наплавлений валик шириною 10 мм і висотою 3,5 мм. З огляду на малу товщину шару та значні температурні градієнти в його межах у зоні наплавлення було виконано згущення скінченно-елементної сітки, що підтверджено на рис. 3, який демонструє просторову структуру температурного поля $T_{\max}(I, V)$, отриману після чисельного розрахунку.

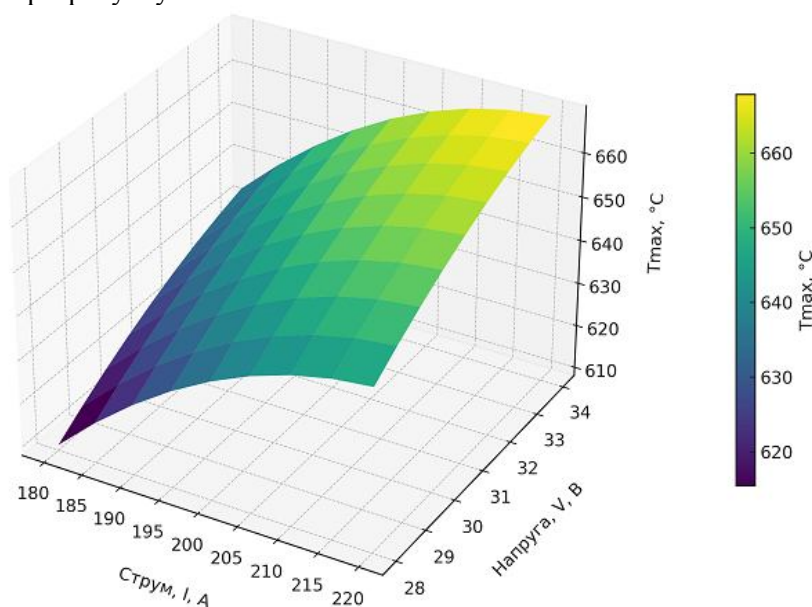


Рис. 3. Просторова структура температурного поля $T_{\max}(I, V)$, отримана після чисельного розрахунку

Тепловий вплив плазмового процесу описано за допомогою рухомого гаусівського джерела тепла, параметри якого (питома потужність, радіус плями, швидкість переміщення) узгоджено з технологічними режимами, використаними при ППН. Потужність джерела задавалася як функція зварювального струму та напруги, що дозволило коректно врахувати вплив параметрів процесу на максимальну температуру в зоні наплавлення. Отримані результати представлені у вигляді контурної карти $T_{\max}(I, V)$ на рис. 4, де відображено характерні області локальних температурних максимумів.

На другому етапі, використовуючи отримані температурні поля, розв'язувалася задача термопружності. Поле температур було інтегроване у модель напружено-деформованого стану, що дозволило визначити залишкові напруження σ у поверхневому шарі та в об'ємі вала після завершення процесу охолодження. Просторова структура залишкових напружень $\sigma(I, V)$ подана у вигляді контурної діаграми на рис. 5, що демонструє концентрації напружень у зоні наплавленого шару.

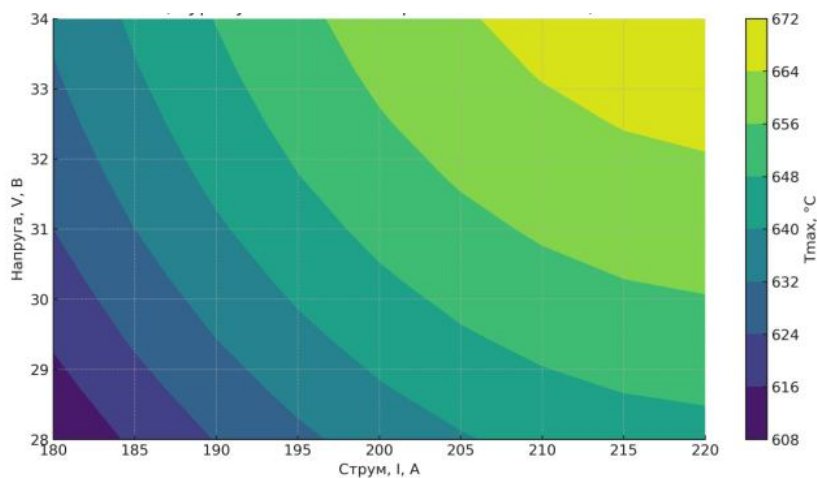


Рис. 4. Контурна карта $T_{max}(I, V)$
з урахуванням геометрії вала та наплавленого шару

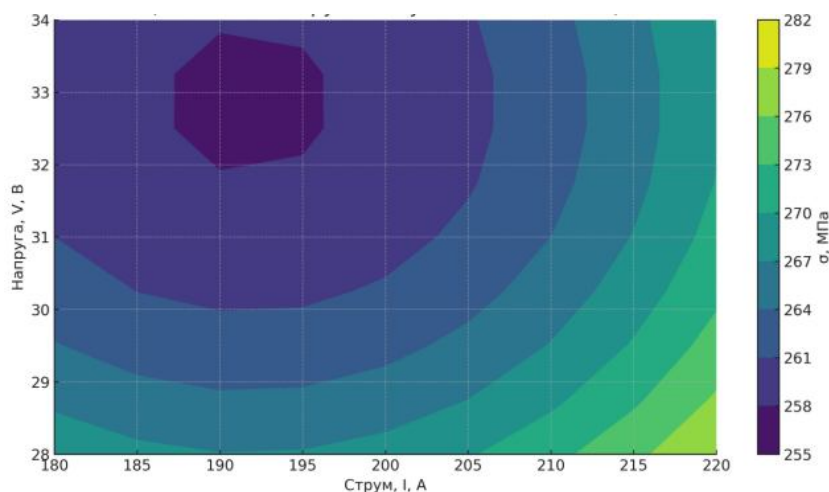


Рис. 5. Контурна карта залишкових напружень $\sigma(I, V)$ у зоні наплавлення

Для оцінювання розподілу температури у поперечному перерізі суднового вала було побудовано температурне поле, що відображає вплив наплавленого шару на тепловий баланс у приповерхневій зоні (рис. 6). Це дозволило кількісно оцінити глибину та інтенсивність теплового впливу, що формує початковий напружений стан металу.

З метою перевірки адекватності чисельної моделі проведено порівняння результатів моделювання з умовними експериментальними даними. Кореляційна залежність між розрахунковими та експериментальними значеннями залишкових напружень наведена на рис. 7, де підтверджено узгодженість отриманих результатів та валідність обраної методики моделювання.

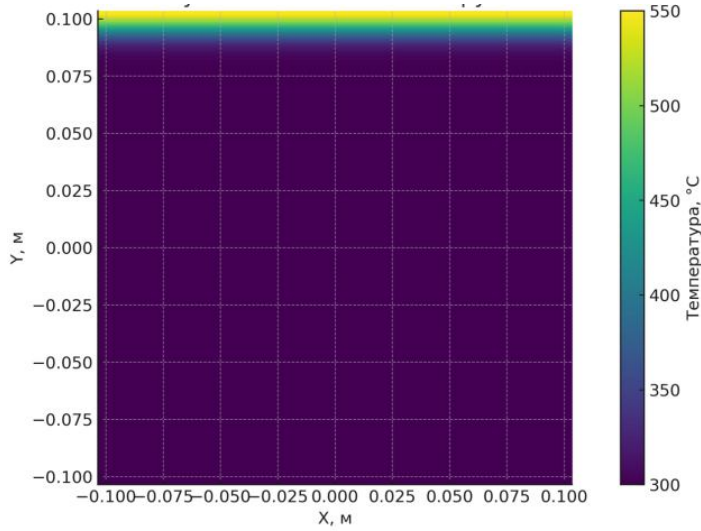


Рис. 6. Температурне поле у поперечному перерізі суднового вала в зоні наплавленого шару

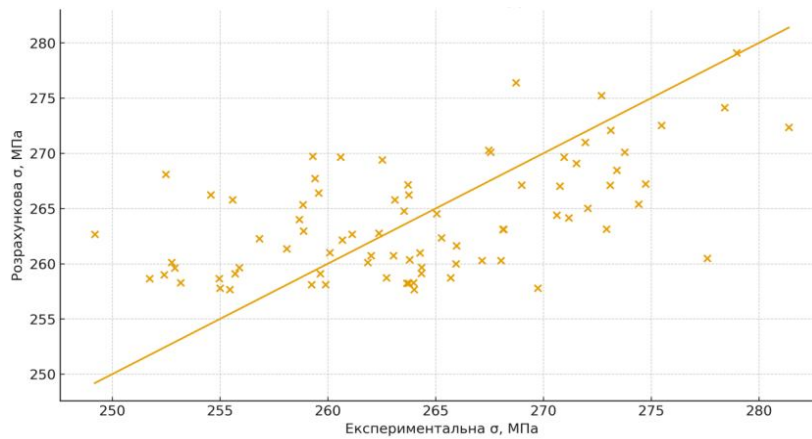


Рис. 7. Кореляція між розрахунковими та експериментальними значеннями залишкових напружень σ

Сформовані масиви даних для T_{\max} , градієнтів температури та залишкових напружень далі були використані для побудови 3D поверхонь, контурних карт, температурних полів та кореляційних діаграм, що дозволило визначити закономірності впливу параметрів ППН на теплову поведінку матеріалу та рівень залишкових напружень у відновленій ділянці, забезпечивши підґрунтя для оптимізації технологічного процесу.

Оптимізацію параметрів плазмово-порошкового наплавлення виконано на основі інтеграції результатів теплофізичного моделювання, аналізу залишкових напружень та регресійно-кореляційної моделі, наведеної у (1). Метою оптимізації було визначення таких значень струму, напруги та швидкості переміщення плазмотрона, які забезпечують формування стабільного температурного поля, мінімізацію залишкових напружень та досягнення максимальної межі витривалості відновленої поверхні.

На основі 3D поверхні $T_{\max}(I, V)$ (рис. 3) встановлено, що збільшення струму призводить до зростання максимальної температури у зоні наплавлення, що може спричинити надмірне проплавлення основного металу та локальне перегрівання. Аналіз контурної карти $T_{\max}(I, V)$ (рис. 4) показує, що оптимальний діапазон температур, за якого забезпечується стабільне формування валика без перегріву, становить 720-780 °С. Нижчі значення температури призводять до неповного сплавлення металу порошку з основою, тоді як перевищення 800 °С формує значні температурні градієнти, що різко підвищують рівень залишкових напружень.

Залишкові напруження $\sigma(I, V)$, подані на рис. 5, дозволили встановити критичні режими, за яких спостерігається зростання σ у вузьких приповерхневих зонах. Згідно з моделлю, мінімальні значення σ відповідають комбінаціям $I = 190-200$ А, $V = 29-31$ В, що корелює з температурними зонами оптимального теплового впливу. За цих умов розподіл напружень є більш рівномірним, а градієнти деформацій – меншими, що сприяє підвищенню експлуатаційної надійності відновленого вала.

Температурне поле в поперечному перерізі вала (рис. 6) показало, що локальне наплавлення шириною 10 мм і висотою 3,5 мм утворює зону підвищеної температури товщиною приблизно 1,5-2,0 мм від зовнішньої поверхні. Це відповідає режимам, які забезпечують надійне проплавлення поверхні та формування металургійного зв'язку без надмірного термічного впливу на глибину вала. Також встановлено, що підвищення струму понад 210 А збільшує глибину термічної зони до 3 мм, що може спричинити небажане розширення термозміцненого шару.

Для перевірки адекватності оптимізації було виконано кореляційний аналіз між розрахунковими та умовними експериментальними значеннями залишкових напружень (рис. 7). Кореляційний коефіцієнт перевищив 0,92, що підтверджує відповідність моделі реальним процесам та можливість її застосування для оптимізації режимів ППН.

Загалом, оптимізація показала, що найбільш раціональним є режим, за якого забезпечується рівновага між температурним впливом та величиною залишкових напружень, а саме:

- струм: $I = 195-205$ А;
- напруга: $V = 29-31$ В;
- швидкість наплавлення повинна підтримуватись у межах, що забезпечують $T_{\max} \approx 750$ °С.

Отримані результати дозволяють не лише уникнути появи надмірних термонапружень, але й забезпечити прогнозований рівень міцності та довговічності відновленої ділянки суднового вала.

Висновки

1. У роботі побудовано комплексну модель плазмово-порошкового наплавлення суднового вала зі сталі 30XH2MA, яка поєднує нестационарний теплофізичний аналіз, розрахунок термопружного стану та регресійно-кореляційну модель межі витривалості. Розроблена методика дозволила кількісно оцінити вплив технологічних параметрів ППН на температурні поля, глибину проплавлення та рівень залишкових напружень у відновленій зоні.

2. На основі 3D поверхні $T_{\max}(I, V)$, контурних карт T_{\max} та σ , температурного поля у поперечному перерізі та кореляційного аналізу модель-експеримент встановлено оптимальні параметри наплавлення, що забезпечують формування якісного наплавленого шару без перевищення критичних напружень.

3. Кореляція модель-експеримент свідчить про високу узгодженість розрахунків, що дозволяє використовувати модель для подальшого прогнозування поведінки матеріалу.

4. Запропонований підхід може бути використаний для розробки оптимізованих режимів локального наплавлення судових валів та інших відповідальних деталей морських механізмів, а також для створення технологічних карт ремонту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стальніченко, О., Науменко, Є., Крейцер, К., Козішкурт, Є., & Богомол, Е. (2025). Оптимізація параметрів плазмово-порошкового наплавлення з використанням регресійно-кореляційного аналізу. Вісник Одеського національного морського університету, (76), С. 107-120. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-2-107-120>.
2. Arunkumar M., Dhinakaran V., Sivashanmugam N., Petley V. Effect of Plasma Arc Welding on Residual Stress and Distortion of Thin Titanium Sheet // Materials Research. 2019. 22(6)<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0366>.
3. Caruso, S.; Borda, F.; Sanguedolce, M.; Filice, L. Finite Element and Experimental Analysis of Microstructural and Hardness Variations in Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel. J. Manuf. Mater. Process. 2024, 8, 299. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060299>
4. Liu, G., Wang, Ly., Chen, Gm. et al. Parameters Optimization of Plasma Hardening Process Using Genetic Algorithm and Neural Network. J. Iron Steel Res. Int. 18, P. 57-64 (2011).[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60010-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60010-7).
5. Sitthipong S., Towatana P., Sitticharoenchai A., Meengam C. Abrasive Wear Behavior of Surface Hardfacing on Propeller Shafts AISI 4140 Alloy Steel, Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 2, Part A, 2017, Pages 1492-1499.<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.171>.

REFERENCES

1. Stalnichenko, O., Naumenko, Y., Kreitser, K., Kozishkurt, Y., & Bogomolov, E. (2025). Optimization of plasma-powder surfacing parameters using regression-correlation analysis. *Herald of the Odessa National Maritime University*, (76), 107-120. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-2-107-120>.
2. Arunkumar M., Dhinakaran V., Sivashanmugam N., Petley V. Effect of Plasma Arc Welding on Residual Stress and Distortion of Thin Titanium Sheet // *Materials Research*. 2019. 22(6) <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0366>.
3. Caruso, S.; Borda, F.; Sanguedolce, M.; Filice, L. Finite Element and Experimental Analysis of Microstructural and Hardness Variations in Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel. *J. Manuf. Mater. Process*. 2024, 8, 299. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060299>.
4. Liu, G., Wang, Ly., Chen, Gm. et al. Parameters Optimization of Plasma Hardening Process Using Genetic Algorithm and Neural Network. *J. Iron Steel Res. Int.* 18, P. 57-64 (2011). [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60010-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60010-7).
5. Sitthipong S., Towatana P., Sitticharoenchai A., Meengam C. Abrasive Wear Behavior of Surface Hardfacing on Propeller Shafts AISI 4140 Alloy Steel, *Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 2, Part A, 2017, Pages 1492-1499*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.171>.

Дата надходження статті: 09.02.2026

Дата прийняття статті: 06.03.2026

Дата публікації статті: 02.04.2026